

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Aplikovaná geologie

Studijní obor: Aplikovaná geologie se zaměřením



Mgr. Zdeňka Pastyriková

Vliv CaO na strukturu a propustnost jílovité zeminy

Influence of CaO on structure and permeability of clayey soil

Disertační práce

Školitel: Ing. Jan Boháč, CSc.

Školitel-konzultant: Prof. Mgr. Richarda Přikryla, Dr.

Praha, 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 18. července 2016

Podpis

Poděkování

Tato disertační práce by nevznikla bez podpory Ing. Jana Boháče, CSc., Prof. Mgr. Richarda Příkryla, Dr. a Ing. Ivony Sedlářové, Ph.D. Ing. Jan Boháč, CSc. mi poskytl skvělé podmínky pro výzkum v laboratoři mechaniky zemin na Karlově univerzitě v Praze. Prof. Richard Příkryl, Dr. mě podrobněji seznámil s měřením a vyhodnocením výsledků rentgenové difrakce a provedl vyhodnocení difrakčních záznamů. Ing. Ivona Sedlářová, Ph.D. z ústavu anorganické technologie VŠCHT mě seznámila s rtuťovým porozimetrem a provedla na tomto zařízení všechna měření.

Jmenovitě bych chtěla poděkovat Ing. Jaroslavu Pavlíkovi, Ph.D, který mi po celou dobu výzkumu ochotně dodával pálené vápno z vápenky Čertovy schody a.s., RNDr. Jaroslavu Maixnerovi, CSc. a Mgr. Viktoru Goliášovi Ph.D. za provedení rentgenové difrakční analýzy na práškových vzorcích upravených a neupravených vápnem, RNDr. Radku Hanusovi, Ph.D. za výpočet procentuálního zastoupení minerálů ve studované zemině, Ing. Věře Vonáskové za stanovení obsahu volných vápenatých iontů ve výluzích, Mgr. Viktoru Sotorníkovi za pečlivé vypracování bakalářské práce na téma Vliv vápna na konzistenční meze prachovité zeminy a Ing. Vladimíru Plachému, Ph.D. za sušení vzorků v lyofilizátoru na fakultě agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů ČZU Praha.

Dále bych chtěla poděkovat pracovníkům laboratoře geomechaniky Arcadis CZ za stanovení zrnitostního složení a konzistenčních mezí studované zeminy a laboratoři analytické chemie Gematest spol. s.r.o. za provedení silikátové analýzy studované zeminy.

V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mým pracovním kolegům, a to Mgr. Janě Němečkové a Aleši Chýlemu, za cenné rady a poskytnutí skvělých podmínek pro práci v laboratoři geomechaniky Arcadis CZ.

Také bych chtěla poděkovat za finanční podporu projektu GAUK 62008 Vliv příměsí CaO na texturu a propustnost jílovité zeminy a projektu FR-TI4/714 Výzkum a inovace úprav horninového prostředí vápennými aditivami, bez kterých by tato práce nevznikla.

Na závěr bych chtěla poděkovat nejen svému manželovi, ale také všem mým kolegům a přátelům, kteří mě v práci podporovali.

Abstrakt

Cílem této práce bylo zjistit vliv množství vápna (1 – 8% CaO) a doby zrání (1 – 540 dní) na strukturu jemnozrnné zeminy hutněné při optimální vlhkosti energií Proctor standard a zda očekávaná změna struktury zeminy ovlivní její hydraulickou vodivost. Pomocí rtuťové porozimetrie (MIP) byla na laboratorně zhutněných vzorcích spraše s 1, 2, 4 a 8% CaO studována změna pórového prostoru po dlouhou dobu zrání (1 – 540 dní). Průběh pucolánových reakcí byl monitorován měřením pH. Vznik nových minerálních fází (hydratovaný silikát vápenatý a hydratovaný hlinitan vápenatý a hydratovaný hlinitouhličitan vápenatý) ve vápněné zemině byl potvrzen RTG difrakcí.

Rtuťová porozimetrie odhalila, že 2% CaO je dostačující pro vznik pucolánových reakcí. Toto množství vápna je pod stanovenou hodnotou optimálního množství vápna, které bylo stanoveno za pomoci pH měření (Eades a Grim, 1966). Dokud hodnota pH neklesne pod hodnotou 11,7, jsou pozorovatelné změny pórového prostoru. U zeminy s obsahem 4%, respektive 8% vápna byl pokles množství makropórů a nárůst množství mezopórů pozorovatelný během 360 dní, respektive během 540 dní zrání a při obsahu 2% CaO pokles makropórů byl ukončen po 120 dnech zrání, což je způsobeno tvorbou nových minerálních fází během pucolánových reakcí. Při obsahu 1% vápna změna zastoupení makropórů byla pozorována pouze prvních 28 dní zrání vlivem vzniku portlanditu.

Hydraulická vodivost nevápněné zeminy klesá během prvních 40-ti dní propouštění a dosahuje po zhruba 100 dnech propouštění hodnoty $k \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$. Zemina upravená 1% CaO i po 28 dnech zrání je propustnější než neupravená zemina. Zkouška propustnosti neměla vliv na změnu distribuce mezopórů ani hrubých pórů, avšak došlo k redistribuci makropórů bez většího vlivu na její hodnotu pórovitosti n_{MIP} . Zemina upravená 8% CaO a zrající déle než 14 dní dosáhla během dlouhodobé zkoušky propustnosti velmi blízkých hodnot hydraulické vodivosti neupravené zeminy. Zkouška propustnosti neměla vliv na změnu distribuce hrubých pórů, pouze vzrostla pórovitost mezopórů na úkor pórovitosti makropórů, což je přisuzováno tvorbě novotvořených minerálních fází i pod hladinou vody.

Abstract

The aim of this study was to determine the effect of quicklime (1 – 8% CaO) and maturation time (1 – 540 days) on the structure of clayey soil compacted at optimum moisture content by Proctor standard energy and whether expected change in structure affects the long - term permeability. The change of pore space of compacted loess with 1-8% lime (CaO) was studied by mercury porosimetry (MIP) for a long period of maturation (from 1 to 540 days). Development of pozzolanic reactions were monitored by measuring the pH. The development of new mineral phases (calcium silicate hydrates, calcium aluminate hydrates and calcium aluminate carbonate hydrate) in the treated soil was investigated by using X-Ray diffraction. The MIP indicated that 2% of CaO were sufficient for long term pozzolanic reaction. The threshold value is below the initial consumption of lime determined from the pH measurements (Eades and Grim, 1966).

The alteration of the voids of the lime treated soil is noticeable, but the pH value can not drop below 11.7. At 4% of CaO, at 8% of CaO respectively, the macroporosity kept decreasing due to increasing mesoporosity for 360 curing days, for 540 curing days respectively, due to the new mineral phases. At 2% of CaO, the decrease of the macroporosity stops after 120 days. Below 2% of lime, the changes of the macroporosity were detected during first 28 curing days due to the The hydraulic conductivity of untreated soil decreases during the first 40 days and the value $k \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{m/s}$ is reached after about 100 days. The soil with 1% of CaO after 28 days is more permeable than the untreated soil. Permeability test did not affect the change in the distribution of mesopores or of coarse pores, but there was a redistribution of macropores without any major impact on its porosity value n_{MIP} . The soil with 8% of CaO and maturing in more than 14 days reached during the test period very close values of the hydraulic conductivity of untreated soil. Permeability test had no influence on the change in the distribution of coarse pores, macroporosity kept decreasing due to increasing mesoporosity which is ascribed due to the formation of newly formed mineral phases under the water.

Obsah

Seznam tabulek.....	9
Seznam obrázků.....	11
Symboly.....	16
Zkratky.....	18
Úvod.....	20
1. Úprava zemin vápnem.....	22
1.1 Požadavky na zeminu upravenou vápnem.....	22
1.2 Technické vlastnosti vápna pro úpravu zemin.....	23
2. Reakce vápna se zeminou.....	24
2.1 Okamžité reakce.....	24
2.1.1 Hydratace vápna.....	24
2.1.2 Flokulace.....	24
2.2 Dlouhodobé (pucolánové) reakce.....	26
2.3 Novotvořené fáze.....	29
2.3.1 Hydratované silikáty vápenaté.....	29
2.3.2 Hydratované hlinitany vápenaté.....	30
2.3.3 Hydratované hlinitokřemičitany vápenaté.....	30
2.4 Karbonatace vápna.....	30
3. Optimální množství vápna.....	32
3.1 Stanovení OMV pomocí měření pH (ICL).....	32
3.2 Stanovení OMV pomocí konzistenčních mezí (LFP).....	33
3.3 Stanovení OMV pomocí měření pevnosti v tlaku (LSO).....	34
3.4 Další možnosti stanovení OMV.....	35
4. Hydraulická vodivost a pórovitost upravených zemin vápnem.....	37
4.1 Vliv přirozené vlhkosti zeminy na pórovitost a distribuci pórů.....	40
4.2 Vliv způsobu hutnění na pórovitost a hydraulickou vodivost.....	43

4.3 Vliv hutnící energie.....	45
4.4 Vliv množství a typu jílových částic.....	50
4.5 Vliv množství vápna.....	51
4.6 Vliv doby zrání.....	54
4.7 Shrnutí.....	57
5. Vlastnosti použitého materiálu.....	59
5.1 Zemina.....	59
5.1.1 Zrnitost zeminy a konzistenční meze.....	60
5.1.2 Chemické a mineralogické složení studované zeminy.....	61
5.2 Vápno.....	62
6. Použité měřicí metody.....	63
6.1 Rtuťová porozimetrie (MIP).....	63
6.1.1 Popis přístroje a průběh MIP.....	63
6.1.2 Data získaná z MIP.....	65
6.1.3 Sušení vzorku.....	65
6.1.4 Nespolehlivosti MIP.....	65
6.2 Stanovení OMV.....	66
6.3 Hydraulická vodivost.....	66
6.4 Rentgenová difrakce.....	67
6.5 Stanovení vápenatých iontů ve výluhu.....	67
7. Příprava zkušebních vzorků.....	68
7.1 Příprava zkušebních vzorků dle ČSN EN 13286-2.....	68
7.2 Modifikovaná příprava zkušebních vzorků.....	70
7.3 Suchá objemová hmotnost – vlhkost.....	71
7.4 Příprava vzorků pro měření pomocí MIP.....	72
7.5 Příprava vzorků na propustnost.....	72
8. Výsledky – pH a konzistenční meze.....	73
8.1 Optimální množství vápna.....	73
8.2 Vývoj pH s dobou zrání.....	74
8.3 Vývoj konzistenčních mezí s dobou zrání.....	76
8.4 Shrnutí.....	76
9. Výsledky – rtuťová porozimetrie.....	77
9.1 Vliv množství vápna na distribuci pórů a pórovitost nMIP.....	77
9.2 Vliv doby zrání na distribuci pórů.....	79

9.2.1 Výsledky RTG difrakce.....	80
9.3 Vliv doby zrání na pórovitost nMIP.....	82
9.4 Shrnutí.....	84
10. Výsledky – hydraulická vodivost a změna distribuce pórů vlivem propouštění.....	86
10.1 Neupravená zemina.....	86
10.1.1 Hydraulická vodivost neupravené zeminy.....	87
10.1.2 Výsledky rtuťové porozimetrie neupravené zeminy.....	88
10.1.3 Statistické vyhodnocení výsledků rtuťové porozimetrie neupravené zeminy.....	89
10.2 Zeminy upravené 1% CaO.....	90
10.2.1 Hydraulická vodivost zemin upravených 1% CaO.....	91
10.2.2 Výsledky rtuťové porozimetrie zemin upravených 1% CaO.....	91
10.2.3 Statistické vyhodnocení výsledků MIP zemin upravených 1% CaO.....	93
10.3 Zeminy upravené 8% CaO.....	94
10.3.1 Hydraulická vodivost zemin upravených 8% CaO.....	95
10.3.2 Výsledky rtuťové porozimetrie zemin upravených 8% CaO.....	96
10.3.3 Statistické vyhodnocení výsledků MIP zemin upravených 8% CaO.....	97
10.4 Vliv změny pórovitosti na hydraulickou vodivost.....	99
10.5 Obsah Ca ²⁺	101
10.6 Shrnutí.....	101
11. Diskuze.....	103
11.1 Porovnání metod stanovení optimálního množství vápna.....	103
11.2 Rtuťová porozimetrie.....	104
11.3 Hydraulická vodivost.....	106
12. Závěr.....	109
Literatura.....	111
Přílohy.....	119

Seznam tabulek

Tabulka 1.1 Chemické složení vápna a jeho fyzikální vlastnosti (ČSN EN 459 – 1, 2011).....	23
Tabulka 4.1 Klasifikace pórů podle Kodikara et al. (1999).....	38
Tabulka 4.2 Klasifikace pórů podle IUPAC.....	38
Tabulka 5.1 Výsledky základní silikátové analýzy.....	61
Tabulka 5.2 Procentuální zastoupení minerálů ve zkoumané zemině.....	62
Tabulka 7.1 Pórovitost nMIP vzorků a,b odebraných z horní (TT), střední (MT) a spodní (BT) třetiny zeminy s 1% CaO po 1 dni zrání.....	69
Tabulka 7.2 Pórovitost nMIP vzorků a,b,c,d,e,f odebraných z dolní (DT) třetiny zeminy s 1% CaO po 1 dni zrání.....	71
Tabulka 7.3 Suché objemové hmotnosti a vlhkosti hutněné směsi spraše s 1%, 2%, 4% a 8% CaO dosažené po 2 hodinách zrání.....	72
Tabulka 9.1 Porovnání vlhkosti a suché objemové hmotnosti zeminy s 0% , 1% nebo 3% vápna stanovené Cusinierem et al. (2011) po 28 dnech zrání, Le Runigem et al. (2009) po 0 dnech zrání a Metelkovou et al. (2012) po 1 dni zrání.....	78
Tabulka 9.2 Pórovitost nMIP vzorků s 0% - 8% CaO po 1 dni zrání.....	79
Tabulka 9.3 Vývoj rmode (μm) s rostoucím množstvím vápna a s dobou zrání.....	79
Tabulka 9.4 Vývoj pórovitosti nMIP (%) s rostoucím množstvím vápna a dobou zrání.....	83
Tabulka 9.5: Spearmanův koeficient korelace R_{xy} a Pearsonův koeficient korelace r_{xy}	84
Tabulka 10.1 Fyzikální parametry vzorku 0a_1 spočtené před zkouškou propustnosti, po 35 dnech sycení a po 41 dnech sycení.....	86
Tabulka 10.2 Fyzikální parametry zeminy s 0% CaO po 1 dni zrání spočtené po ořezání dolní a horní podstavy před a po zkoušce propustnosti.....	87
Tabulka 10.3 Fyzikální parametry zeminy s 0% CaO po 1 dni zrání před a po zkoušce propustnosti.....	87

Tabulka 10.4 Vlhkosti a suché objemové hmotnosti hutněných vzorků stanovených po hutnění.....	90
Tabulka 10.5 Fyzikální parametry zeminy s 1% CaO po 1, 7, 14 a 28 dnech zrání spočtené před a po zkoušce propustnosti.....	90
Tabulka 10.6 Vlhkosti a suché objemové hmotnosti hutněných vzorků stanovených po hutnění.....	94
Tabulka 10.7 Fyzikální parametry zeminy s 8% CaO po 1, 7, 14, 28 a 120 dnech zrání spočtené před a po zkoušce propustnosti.....	95

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Změna křivky zrnitosti Ankara clay (jíl s vysokou plasticitou s převahou smektitu) s různým množstvím vápna po 28 dnech zrání (Tonoz et. al, 2004).....	26
Obrázek 2.2 Vliv vlhkosti na pevnost v prostém tlaku (28 dní zrání, Consoli et al., 2009).....	29
Obrázek 3.1 Výsledky ICL testu pro londýnský jíl (Rogers et al.,1997).....	33
Obrázek 3.2 Vliv množství vápna na konzistenční meze londýnského jílu (Rogers et al., 1997).....	34
Obrázek 3.3 Závislost meze plasticity na pevnosti v prostém tlaku na 2 typech jílovitých zemin upravených vápnem (Hilt a Davidson, 1960; upraveno).....	35
Obrázek 3.4 a) Záznam RTG difrakce hydratovaného vápna, neupraveného bentonitu a směsi bentonitu s 6, 8, 10 a 20% hydratovaného vápna po 1 dni zrání b)Vývoj intenzity dvou hlavních píků nespotřebovaného vápna po jednom dni zrání pro různá množství vápna přidanych do jílu s extrémní plasticitou (Al-Mukhtar, et. al, 2010a).....	35
Obrázek 4.1 Strukturní elementy a typy pórů (Kodikara et al., 1999).....	38
Obrázek 4.2 Schématické rozřídění pórů vzhledem k jejich dostupnosti pro kapalinu, upraveno podle IUPAC (Kodikara et al., 1999).....	39
Obrázek 4.3 Kumulativní křivky MIP měřené na směsi prachovité zeminy s a) 0% a b) 3% CaO hutněné při wopt, „wdry“ a „wwet“ a po 0 dnech zrání (Russo et al., 2007).....	40
Obrázek 4.4 Kumulativní křivky MIP měřené na směsi prachovité zeminy s 3% CaO hutněné při wopt, „wdry“ a „wwet“ po 0 – 28 dnech zrání (Russo et al., 2007).....	41
Obrázek 4.5 Distribuce pórů zeminy neupravené a upravené 1% a 3% CaO po 0 dnech zrání.	42
Obrázek 4.6 Distribuce pórů zeminy s (a) 1% CaO a (b) 3% CaO hutněné energií Proctor standard při optimální vlhkosti stanovená při různých dobách zrání (Le Runigo et al.,	

2009).....	42
Obrázek 4.7 Distribuce pórů zemin s a) 1% CaO a b) 3% CaO hutněných energií Proctor standard (NE) při různých vlhkostech (DMC, OMC, WMC; Le Runigo et al., 2009).	43
Obrázek 4.8 Vliv způsobu hutnění na hydraulickou vodivost prachovitého jílu (Mitchell, 1976).....	44
Obrázek 4.9 Vliv způsobu hutnění na hydraulickou vodivost směsi prachovité zeminy s 2% a 3% CaO(QL) po 28 dnech zrání (Cuisinier et al., 2011, upraveno).....	44
Obrázek 4.10 Distribuce pórů zeminy s a) 0%, b) 2% a c) 3% CaO (QL) hutněné energií P nebo K při OMC (plná čára) a při 1,2*OMC (čárkovaná čára) (Cusinier et al., 2011).	45
Obrázek 4.11 (a) Hydraulická vodivost prachovitého jílu při 100% nasycení (b) hutněných při 3 různých hutnících energií. (c) Závislost hydraulické vodivosti prachovitého jílu hutněného různými energiemi na suché objemové hmotnosti (data překreslena z grafu a), Mitchell et al., 1965).....	46
Obrázek 4.12 Vliv hutnící energie na distribuci pórů zeminy s 1% CaO a 3% CaO hutněné při různých vlhkostech (DMC, OMC, WMC; Le Runigo et al., 2009).....	47
Obrázek 4.13 (a) Závislost hydraulické vodivosti prachovité zeminy s 1% a 3% CaO při 100% nasycení hutněných energií NE (Δ) a LE (\times) na vlhkosti (překresleno z dat Le Runigo et al., 2009) (b) vlhkosti a suchá objemové hmotnosti zeminy s 1% a 3% CaO hutněné energií HE (\blacksquare), NE a LE stanovené po 25 dnech zrání (Le Runigo et al., 2009).....	48
Obrázek 4.14 Vývoj hydraulické vodivosti v průběhu 150 dnů propouštění zeminy upravené 1% a 3% CaO (Le Runigo et al., 2009).....	48
Obrázek 4.15 Vývoj mikrostruktury zeminy upravené 1% a 3% CaO před a po 7 dnech sycení (7 days immersion) a po 150 dnech propouštění (leached) (Le Runigo et al., 2009).....	49
Obrázek 4.16 Vývoj hydraulické vodivosti zeminy s rostoucím indexem plasticity a aktivitou jílu (Benson et al., 1994).....	50
Obrázek 4.17 (a) Vývoj hydraulické vodivosti v závislosti na pórovitosti zeminy s 0, 5 a 10% Ca(OH) ₂ stanovená po 30, 100 a 200 dnech zrání a (b) Vliv množství vápna na vývoj hydraulické vodivosti po 30 dnech zrání (Locat et al., 1990).....	51
Obrázek 4.18 a) Vliv množství vápna na hydraulickou vodivost zeminy stanovenou po 600	

hodinách propouštění, b) změna hydraulické vodivosti zeminy s 1 – 8% vápna během 45 dní (McCallister a Petry, 1992).....	52
Obrázek 4.19 a) Změny pH výluhu měřený v průběhu 45 dní propouštění (McCallister a Petry, 1992), b) změny koncentrace Ca^{2+} ve výluhu měřené v průběhu 45 dní propouštění (McCallister a Petry, 1990).....	53
Obrázek 4.20 Výsledky MIP 4 zemin s 4% CaO po 0, 30 a 300 dnech (Choquette et al., 1987).	54
Obrázek 4.21 Snímky SEM novotvořených CASH fází u zeminy Buckingham s 4% CaO po 100 dnech zrání (Choquette et al., 1987).....	54
Obrázek 4.22 Vývoj hydraulické vodivosti zeminy s 4%, 6% a 8% vápna s dobou zrání (upraveno, Osinubi, 1998).....	55
Obrázek 4.23 Závislost hydraulické vodivosti vápnem upravené zeminy na množství vápna zrající při teplotě 25°C a 75°C po dobu 1 a 24 týdnů (Wild et al., 1987).....	56
Obrázek 5.1 Zemník spraše u obce Horky nad Jizerou, červená šipka vyznačuje místo odběru.	59
Obrázek 5.2 Spraš ze zemníku Horky nad Jizerou při přirozené vlhkosti.....	60
Obrázek 5.3 Zrnitostní křivka spraše ze zemníku Horky nad Jizerou, použité pro experimentální výzkum.....	60
Obrázek 7.1 Suchá objemová hmotnost – vlhkost zeminy s 1% vápna mísené ručně a hutněné energií PS ve třech vrstvách nebo mísené mixérem a hutněné energií PS v jedné vrstvě.....	68
Obrázek 7.2 Distribuce pórů 2 vzorků (a, b) odebraných z dolní (BT), střední (MT) a horní (TT) třetiny vzorku.....	69
Obrázek 7.3 Distribuce pórů vzorků a, b, c, d, e a f odebraných z tělesa zeminy s 1% CaO...	70
Obrázek 7.4 Suchá objemová hmotnost – vlhkost zeminy s různým množstvím vápna hutněné energií PS v jedné vrstvě.....	71
Obrázek 8.1 Vývoj pH s rostoucím množstvím vápna.....	73
Obrázek 8.2 Vývoj wP s rostoucím množstvím vápna po 48 hodinách zrání a vývoj IP po 1 hodině zrání s rostoucím množstvím CaO (s využitím výsledků Sotorníka, 2011).....	74
Obrázek 8.3 Vývoj pH s dobou zrání.....	75

Obrázek 8.4 Vývoj w_L , a w_P s rostoucí dobou zrání u směsi zeminy s 0%, 0,5%, 1%, 2%, 2,5% a 3% CaO (s využitím výsledků Sotorníka, 2011).....	75
Obrázek 9.1 Distribuce pórů zeminy s 0%, 1%, 2%, 4% a 8% CaO po 1 dni zrání.....	77
Obrázek 9.2 Distribuce pórů zeminy s 1%, 2%, 4% a 8% CaO po 1, 7, 14, 28, 56, 120, 240, 360 a 540 dnech zrání.....	80
Obrázek 9.3 RTG difrakce spraše s 8%CaO po 1, 7, 14, 28, 56, a 120 dnech zrání.....	81
Obrázek 9.4 Vývoj pH s rostoucí dobou zrání u zeminy s 1% - 8% CaO.....	82
Obrázek 9.5 Vývoj a) pórovitosti mezopórů, b) pórovitosti makropórů (prázdné znaky) a hrubých pórů (plné znaky)s rostoucí dobou zrání pro směsi zeminy s různým obsahem vápna spojnice trendu pro 1% CaO (plná čára), pro 2% CaO (přerušovaná čára), pro 4% CaO (čárkovaná čára) a pro 8% CaO (tečkovaná čára).....	83
Obrázek 10.1 Průběh hydraulické vodivosti zeminy s 0% CaO po 1 dni zrání.....	88
Obrázek 10.2 Porovnání distribuce pórů vzorku neupravené zeminy před zkouškou propustnosti s distribucí pórů vzorků odebraných z a) dolní (DD) nebo b) horní (HD) podstavy po 41 a 101 dnech propouštění.....	88
Obrázek 10.3 Vývoj pórovitosti a) makropórů a b) mezopórů a hrubých pórů u dolní podstavy (DD, čárkovaná čára), u horní podstavy (HD, plná čára) a ve středu vzorku (MT, tečkovaná čára) s rostoucí dobou propouštění.....	89
Obrázek 10.4 Vývoj hydraulické vodivosti zeminy s 1% CaO s rostoucí dobou propouštění. 91	
Obrázek 10.5 Distribuce pórů zeminy s 1% CaO po 1, 7, 14 a 28 dnech zrání před a po zkoušce propustnosti.....	92
Obrázek 10.6 Porovnání pórovitostí mezopórů, makropórů a hrubých pórů zeminy s 1% CaO stanovené před zahájením (prázdné znaky) a po ukončení zkoušky propustnosti (plné znaky).....	93
Obrázek 10.7 Pórovitosti mezopórů, makropórů a hrubých pórů u zeminy s 1% CaO různé doby stáří stanovená rtuťovou porozimetrií před (plné znaky) a po zkoušce propustnosti (prázdné znaky).....	94
Obrázek 10.8 Vývoj hydraulické vodivosti zeminy s 8% s rostoucí dobou propouštění.....	96
Obrázek 10.9 Distribuce pórů zeminy s 8% CaO po 1, 7, 14, 28 a 120 dnech zrání stanovená před a po zkoušce propustnosti.....	97
Obrázek 10.10 Porovnání pórovitostí mezopórů, makropórů a hrubých pórů zeminy s 8% CaO stanovené před zahájením (prázdné znaky) a po ukončení zkoušky propustnosti	

(plné znaky).....	98
Obrázek 10.11 Pórovitosti mezopórů, makropórů a hrubých pórů u zeminy s 8% CaO různé doby stáří stanovená rtuťovou porozimetrií před (plné znaky) a po zkoušce propustnosti (prázdné znaky).....	99
Obrázek 10.12 Závislost hydraulické vodivosti na pórovitosti zeminy s 0%, 1% a 8% CaO stanovené po zkoušce propustnosti.....	100
Obrázek 10.13 Závislost hydraulické vodivosti stanovené po 40 dnech propouštění (plné znaky) a poslední den propouštění (prázdné znaky) na pórovitosti makropórů a mezopórů.....	100
Obrázek 10.14 Stanovení obsahu iontů Ca^{2+} ve výluhu odebraného po různé době propouštění.....	101

Symboly

$\% CaO$	hmotnostní procenta vápna
g	gravitační zrychlení
r_p	kritický koeficient korelace
r_{xy}	Pearsonův koeficient korelace
R_{xy}	Spearmanův koeficient korelace
$t_{60^\circ C}$	doba potřebná pro dosažení přeměny 80% hasitelného vápna při teplotě 60°C
T	teplota v °C

Pro mechaniku zemin

μ	dynamická vizkozita
ρ_d	objemová hmotnost suché zeminy
$\rho_{d,max}$	maximální suchá objemová hmotnost podle Proctor standard
ρ	hustota tekutiny
G_s	zdánlivá hustota pevných částic
i	hydraulický gradient
I_p	index plasticity
k	hydraulická vodivost
n	pórovitost
S	stupeň nasycení
v	průtoková rychlost
V_{ptot}	celkový objem pórů
V_t	celkový (totální) objem zeminy
w	vlhkost zeminy
w_L	vlhkost na mezi tekutosti
w_{opt}	optimální vlhkost, při které je zemina zhutněna energií Proctor standard na maximální suchou objemovou hmotnost

w_p vlhkost na mezi plasticity

Pro rtuťovou porozimetrii

γ povrchové napětí rtuti

θ úhel smáčení rtuti

ρ_{Hg} hustota rtuti

ρ_s specifická hmotnost (zdánlivá hustota pevných částic)

ρ_z objemová hmotnost suché zeminy

n_{MIP} pórovitost

M_s hmotnost suchého vzorku

r poloměr póru

r_{mode} poloměr pórů s největší četností zastoupení

V_b celkový (totální) objem zeminy

V_d objem prázdného dilatometru

V_m objem rtuti, který zaplnil dilatometr se suchým vzorkem

V_{mode} objem pórů o poloměru r_{mode}

V_p celkový objem pórů přístupných pro médium

V_s objem skeletu zeminy

V_{tot} celkový objem rtuti, která vnikla do pórů o objemu V_p

W_d hmotnost prázdného dilatometru

W_{dms} hmotnost dilatometru se suchým vzorkem zaplněného rtutí

Zkratky

A	Al_2O_3
C	CaO
CAH	hydratovaný hlinitan vápenatý
CASH	hydratovaný hlinitokřemičitan vápenatý
CBR	kalifornský poměr únosnosti
CEC	kationtová výměnná kapacita
CSH	hydratovaný křemičitan vápenatý
DMC	optimální vlhkost snížena o 3% (Le Runigo et al., 2009)
DTA	diferenční termická analýza
EC	elektrická konduktivita
F	Fe_2O_3
H	H_2O
HE	150% hutnicí energie Proctor standard (Le Runigo et al., 2009)
ICL	initial consumption of lime, OMV stanovené pomocí pH testu
IUPAC	Mezinárodní unie pro čistou a užitou chemii
K	hutnicí metoda navržená Kouassi et al. (2000) (Cuisinier et al., 2011)
LE	50% hutnicí energie Proctor standard (Le Runigo et al., 2009)
LFP	lime fixation point, OMV stanovené pomocí konzistenčních mezí
LSO	lime stabilisation optimum, OMV stanovené pomocí pevnosti v tlaku
MIP	rtuťová porozimetrie (mercury intrusion porosimetry)
NE	hutnicí energie Proctor standard (Le Runigo et al., 2009)
OMC	optimální vlhkost zeminy
OMV	optimální množství vápna
P, PS	hutnicí energie Proctor standard
RH	relativní vlhkost vzduchu
S	SiO_2

SEM	skenovací elektronový mikroskop
TKO	skládka tuhého komunálního odpadu
WMC	optimální vlhkost zvýšena o 3% (Le Runigo et al., 2009)

Úvod

Tato doktorská disertační práce vznikla z potřeb praxe, kdy vysoká přirozená vlhkost sprašové hlíny bránila kvalitnímu zhutnění zeminy při výstavbě minerálního těsnění skládky tuhého komunálního odpadu (TKO) v Benátkách nad Jizerou a dosažení požadované hodnoty hydraulické vodivosti tj. $k \leq 10^{-9}$ m/s. Jedno z navrhovaných řešení byla úprava zeminy vápnem (kapitola 1), které se ve stavebnictví nejčastěji využívá ke snížení vlhkosti a k zlepšení zpracovatelnosti zeminy. Avšak zhotovitel se obával, že hydraulická vodivost vápněné spraše nevyhoví požadavkům projektu. Proto v roce 2006 byla v areálu skládky TKO Benátky nad Jizerou zhotovena 3 zkušební pole, kde na jednu část pole byla rozprostřena a posléze zhutněna čistá sprašová zemina bez vápna a na druhou a třetí část byla sprašová hlína smísená s 1% vápna pomocí 1 pojezdu, respektive 2 pojezdů frézy. Zkoušky propustnosti provedené na neporušených vzorcích upravené zeminy odebraných ze zkušebních polí, ale i na vzorcích připravených v laboratoři s 1 – 3% CaO po 1, 7, 14 a 28 dnech zrání prokázaly, že upravená zemina vápnem je propustnější než neupravená zemina (Metelková a Boháč, 2008). Cílem této disertační práce bylo ověřit, zda lze úpravou zeminy přidáním vysokého obsahu vápna (až 8% CaO) či po dlouhé době zrání (až 540 dní) dosáhnout takové změny pórového prostoru v důsledku vzniku novotvořených minerálních fází, což by mělo vliv na pokles hydraulické vodivosti vápněné zeminy.

Pálené vápno v zemině hydratuje za vzniku hydroxidu vápenatého. Vzniklý hydroxid vápenatý se ve vodě disociuje na vápenaté a hydroxylové ionty. Vápenaté ionty se vyměňují s ionty vázanými na povrchu jílových zrn a způsobují jejich flokulaci (kapitola 2). Tento proces způsobuje změnu v zastoupení jednotlivých velikostí pórů v upravené zemině a zvýšení pórovitosti (kapitola 4). Intenzita změny struktury vápněné zeminy závisí na vlhkosti zeminy (Russo et al., 2007; Le Runigo et al., 2009), na množství a typu zastoupených jílových částic (Lambe, 1954; Mitchell, 1976; Kenney et al., 1992; Benson et al., 1994), na množství použitého vápna (McCallister a Petry, 1992; Locat et al., 1996; Quang a Chai, 2015) a na volbě hutnicího zařízení a hutnicí energie (Mitchell et al., 1965; Cuisinier et al., 2011).

Hydroxylové ionty zvyšují pH pórové vody a v zemině vytváří alkalické prostředí. Pokud je hodnota pH dlouhodobě nad 10,9 (Croft, 1964), což by mělo být zajištěno přimícháním optimálního množství vápna (kapitola 3), jsou zajištěny i pucolánové reakce, jejichž produkty dlouhodobě zlepšují nejen mechanické vlastnosti zemin, a to hlavně pevnost, přetvárnost a stlačitelnost, ale také způsobují změnu zastoupení jednotlivých velikostí pórů ve vápněné zemině, které mohou být pozorovatelné i po roce zrání (Choquette et al., 1987; Metelková et al., 2012). Cílem této práce bylo zjistit, zda dlouhodobě pozorovatelné změny struktury jemnozrnné zeminy upravené 1% - 8% CaO se mohou projevit v poklesu hydraulické vodivosti vápněné zeminy.

Experimentální výzkum proběhl na směsi jílovitého siltu s 1% - 8% CaO (kapitola 5). Velký důraz byl kladen na přípravu zkušebních vzorků, aby byla zajištěna homogenita pórového prostoru (kapitola 7). Změny pórového prostoru studované zeminy s rostoucím množstvím vápna a s rostoucí dobou zrání byly sledovány pomocí rtuťové porozimetrie a hydraulická vodivost vápněných zemin po různé době zrání byla stanovena zkouškou propustnosti (kapitola 6).

Kapitola 8 porovnává 4 způsoby stanovení optimálního množství vápna, a to pomocí pH testu (Eades a Grim, 1966), výpočtem ze zrnitostního složení zeminy podle Hilt a Davidsona (1960) a dále ze závislosti indexu plasticity na množství vápna stanovené po 1 hodině zrání zeminy s vápnem (Eades a Grim, 1966) a ze závislosti vlhkosti na mezi plasticity na množství vápna stanovené po 48 hodinách zrání zeminy s vápnem (Hilt a Davidson, 1960).

V kapitole 9 je graficky zobrazena změna pórového prostoru směsi zeminy s 1%, 2%, 4% a 8% CaO po 1, 7, 14, 28, 56, 120, 180, 240, 360 a 540 dnech zrání. Výsledky uvedené v kapitole 9 jsem statisticky vyhodnotila a spolu se spoluautory publikovala v časopise *Applied clay science* (Metelková et al., 2012).

V kapitole 10 jsou uvedeny výsledky dlouhodobého měření hydraulické vodivosti směsi s obsahem vápna pod stanovené OMV (1% CaO) a směsi s obsahem vápna nad stanovené OMV (8% CaO). U zkoušených směsí jsem před a po zkoušce propustnosti odebírala vzorky, které jsem podrobila zkoušce rtuťové porozimetrie a výsledky jsem statisticky vyhodnotila.

V kapitole 11 jsou komentovány vlastní výsledky, jejich srovnání s údaji uváděnými v odborné literatuře a na základě toho jejich výklad.

Poslední kapitola shrnuje poznatky této práce a předkládá doporučení úpravy zeminy vápnem všude tam, kde je kladen důraz na nízkou hydraulickou vodivost upravené zeminy.

1. Úprava zemin vápnem

Úprava zemin vápnem je známa již od starověku, ale největší rozsah používání ve světě doznala až počátkem 20. století a v České republice od 60. let 20. století (Bílek, 2002). Tato technologie se začala používat z důvodů nedostatku vhodných zemin, které by bylo možné při přirozené vlhkosti zpracovat do zemního tělesa při výstavbě převážně dopravních a pozemních staveb. Při této úpravě jsou kladeny požadavky nejen na kvalitu vápna (kapitola 1.2), ale i na upravovanou zeminu (kapitola 1.1).

1.1 Požadavky na zeminu upravenou vápnem

S ohledem na typ a výkon mísícího zařízení ČSN EN 14227-11 (2008) v příloze A doporučuje, aby zemina stabilizovaná vápnem obsahovala 95% částic menších než 63 mm. Dále by zemina měla obsahovat více než 12% jílových částic a měla by mít měřitelný index plasticity a jeho hodnota by měla být vyšší než 5%. Podle TP 94 (2013) by zemina neměla obsahovat sírany ani sulfidy nad obsah 1,5%. Sírany se často vyskytují v zemině ve formě sádrovce nebo ve formě síranů hořečnatého nebo sodného. Sírany reagují s vápnem za vzniku etringitu, hydratovaného síranu hlinitovápennatého $[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, který má tvar dlouhých, tenkých hexagonálních prizmatických jehlic o velikosti kolem 0,5 μm (Škvára, 2003). Etringit při svém vzniku na sebe váže velké množství vody a rozpíná se s obrovským krystalizačním tlakem až 20 MPa, což způsobuje objemové změny vápněné zeminy (Wang et al., 2005). Při nižších teplotách ($T < 15^\circ\text{C}$) a za přítomnosti karbonátů sírany reagují s vápnem za vzniku bobtnajícího thaumasitu $[\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)(\text{CO}_3)_2 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ (Mitchell a Dermatas, 1992). Podobný účinek mají chloridy, které reagují s vápnem za vzniku bobtnajících chloroaluminátů. Sulfidy se často vyskytují v zemině ve formě pyritu (FeS_2). Pyrit na vzduchu oxiduje za vzniku síranu železitého a kyseliny sírové. Mezi síranem železitým a draselnými minerály dochází ke kationtové výměně za vzniku jarositu $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$.

Dále by podle TP 94 (2013) neměla zemina určená do zemních těles pozemních komunikací

obsahovat nad 6% organických látek. Ty vyčerpají část přidaného vápna na svou neutralizaci a zamezují tak zvýšení pevnosti vápněné zeminy. Bílek (2002) prokázal na souboru 897 vápněných vzorků, že zvýšením obsahu organických látek o 1% se snižuje pevnost o 0,04 – 0,05 MPa.

1.2 Technické vlastnosti vápna pro úpravu zemin

Pro zlepšení zemin vápnem se nejčastěji používá vzdušné jemně mleté nehasené vápno, která musí splňovat požadavky ČSN EN 459 – 1 (2011), třídy CL 90 nebo CL 80, uvedené v tabulce 1.1.

Tabulka 1.1 Chemické složení vápna a jeho fyzikální vlastnosti (ČSN EN 459 – 1, 2011).

	CL 90	CL 80
CaO + MgO	min. 90% hm.	min. 80% hm.
z toho MgO ¹⁾	max. 5% hm.	max. 5% hm.
CaO volný ²⁾	min. 80% hm.	min. 65% hm.
Obsah hydrátové vody	max. 2% hm.	max. 2% hm.
Zbytek na síť 0,2 mm	max. 2% hm.	max. 2% hm.
$t_{60^{\circ}\text{C}}$ ³⁾	max. 25 min.	max. 25 min.

1) povoluje se obsah MgO až do 7%, vyhoví-li zkouška objemové stálosti dle ČSN EN 459-2 (2011)

2) pálené vápno obsahuje nejen volný CaO, ale i vázaný CaO ve formě CaCO₃, který se však nepodílí na hydrataci.

3) doba potřebná pro přeměnu 80% hasitelného vápna, charakterizuje aktivitu vápna

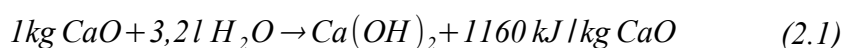
2. Reakce vápna se zeminou

Přidáním vápna do zeminy jsou vyvolány okamžité a dlouhodobé reakce. Výskyt reakcí v upravené zemině závisí na množství přidaného vápna (kapitola 3) a na obsahu volné vody v upravené zemině (TP 94, 2013). Intenzita reakcí závisí na charakteru zeminy, na typu a množství přidaného vápna, na podmínkách zrání (čas, teplota, vlhkost vzduchu) a na kvalitě promísení zeminy s vápnem (Bozbey a Garaisayev, 2009). U jílovitých zemin navíc intenzita reakcí závisí na kationtech sorbovaných na povrchu jílových minerálů a na typu jílových minerálů (Hilt a Davidson, 1960).

2.1 Okamžité reakce

2.1.1 Hydratace vápna

Po přidání páleného vápna do vlhké zeminy se během několika sekund až prvních minut intenzivně spotřebovává voda v zemině za silného vývoje tepla a vzniku suspenze hydroxidu vápenatého v jeho nasyceném roztoku (2.1).



Velikost částic hydroxidu vápenatého závisí na podmínkách hašení, obvykle je to 0,02 – 50 μm (Hlaváč, 1981). Rychlost hydratace se zvyšuje se snižující se velikostí krystalků CaO. Dále je ovlivněna teplotou a čistotou vody a chemickým složením vápna. Přítomnost Al_2O_3 a SiO_2 ve vápně hydrataci urychluje, naopak Fe_2O_3 ji zpomaluje.

Vzniklý hydroxid vápenatý se ve vodě disociuje na vápenaté a hydroxylové ionty. Hydroxylové ionty zvyšují pH pórové vody a v zemině vytváří alkalické prostředí. Vápenaté ionty se vyměňují s ionty vázanými na povrchu jílových zrn a způsobují jejich flokulaci.

2.1.2 Flokulace

Povrch pevné látky v roztoku elektrolytu tvoří elektrická dvojvrstva, která je složená ze dvou

opačně nabitých vrstev. Záporně nabitý povrch pevné látky tvoří tzv. vnitřní vrstva, k níž jsou elektrostatickými a adsorpčními silami přitahovány ionty převážně opačného znaménka. Ty neutralizují povrch tzv. vnější vrstvy. Ionty vnější vrstvy přitahují množství dipólů vody a vytváří na povrchu tuhé látky difúzní vrstvu vody tzv. hydratační obal. Ionty s menším poloměrem mají větší hydratační obal, ale jsou slaběji adsorbovány, proto jsou snadněji nahrazovány vápenatými ionty z vodného roztoku. Tyto reakce způsobí snížení mocnosti elektrické dvojvrstvy a částečnou změnu hustoty elektrických nábojů na povrchu jílových částic, které se navzájem přitahují za vzniku velmi slabých vazeb. Proces shlukování jílových částic se nazývá flokulace.

Výměna iontů probíhá při pH od 7 - 8,5 až do pH 12 – 12,5 (Clare a Cruchley, 1957) a lze je očekávat u všech jemnozrnných zemin (Eades a Grim, 1960). Intenzita iontových výměnných reakcí roste nejen s rostoucí kationtovou výměnnou kapacitou (CEC) minerálních zrn v zemině, ale také s rostoucím množstvím vápna. Reakce probíhají po dobu 24 – 72 hodin (Rogers a Glendinning, 1996).

Tento proces modifikuje fyzikální vlastnosti zeminy, z nichž nejvýznamnější jsou:

a) optimální vlhkost (w_{opt}) a maximální suchá objemová hmotnost zeminy ($\rho_{d,max}$)

Přidáním 1% CaO do zeminy se snižuje $\rho_{d,max}$ a zvyšuje se w_{opt} odpovídající stejné hutnící energii. TP 94 (2013) uvádí, že 1% vápna zvyšuje w_{opt} přibližně o 0,5 – 2% a snižuje $\rho_{d,max}$ o 5 – 100 kg/m³ v závislosti na typu zeminy a na kvalitě promísení zeminy s vápnem. Tento trend se zachovává i s rostoucím množstvím vápna.

b) vlhkost na mezi plasticity (w_p)

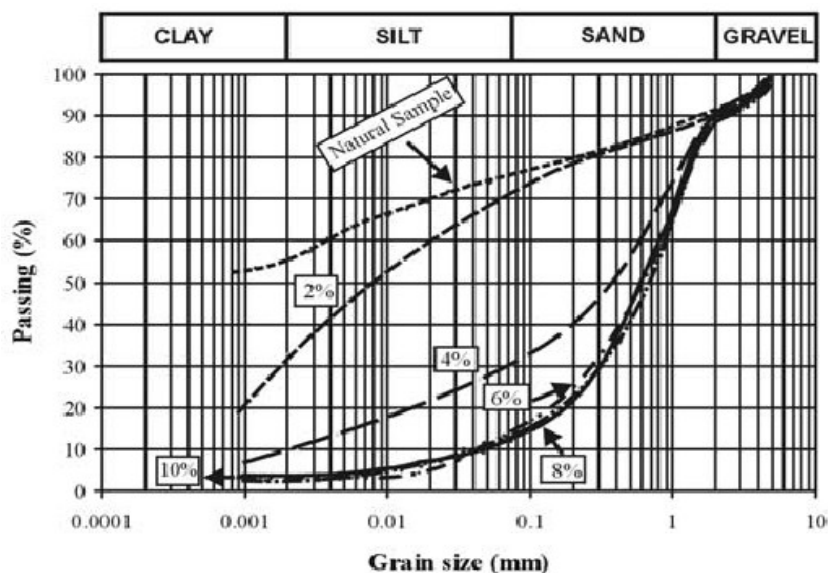
Přimícháním 1% CaO do zeminy se okamžitě zvýší w_p . Vlhkost na mezi plasticity roste s rostoucím množstvím vápna, dokud není překročena hranice optimálního množství vápna (kapitola 3), poté se hodnota w_p výrazně nemění (Clare a Cruchley, 1957; Hilt a Davidson, 1960; Rogers et al., 1997; Lasledj a Al-Mukhtar, 2008, Sotorník, 2011). Nejvyšší nárůst w_p zaznamenal Bell (1996) u montmorilonitu po přidání 4% CaO a u kaolinitu po přidání 2% CaO.

c) vlhkost na mezi tekutosti (w_L)

Ihned po přidání vápna do zeminy s převahou kaolinitu či illitu w_L roste a roste i s rostoucím množstvím vápna (Bell, 1996; Rogers et al., 1997; Sotorník, 2011). Ale u zeminy s převahou jílových minerálů ze skupiny smektitů (Bell, 1996; Boardman et al., 2001; Lasledj a Al-Mukhtar, 2008) vlhkost na mezi tekutosti výrazně klesá a klesá i s rostoucím množstvím vápna.

d) zrnitost

Přidáním vápna se mění zrnitost zeminy. Díky flokulaci se vytváří shluky jílových částic, jejichž velikost odpovídá prachové až písčité částici a jejich počet narůstá s rostoucím množstvím vápna (Obr. 2.1). Obsah jílových částic v zemině klesá s rostoucím množstvím vápna, ale nemění se s dobou zrání (Bílek, 2002).



Obrázek 2.1 Změna křivky zrnitosti Ankara clay (jíl s vysokou plasticitou s převahou smektitu) s různým množstvím vápna po 28 dnech zrání (Tonoz et. al, 2004).

e) bobtnání

Přidáním vápna do expanzivních jíľů se snižuje nebo zcela vymizí bobtnání a klesá i s rostoucím množstvím vápna (Bell, 1996, Nalbantoglu a Tuncer, 2001, Bozbey a Garaisayev, 2009).

2.2 Dlouhodobé (pucolánové) reakce

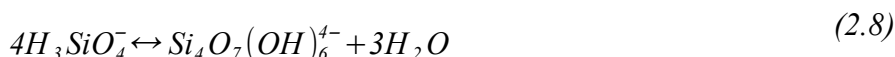
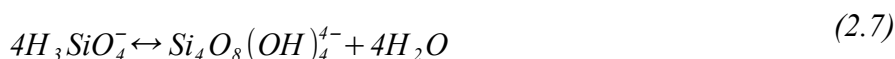
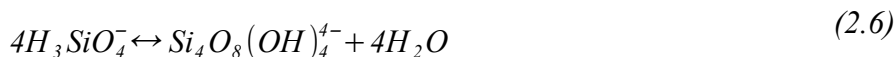
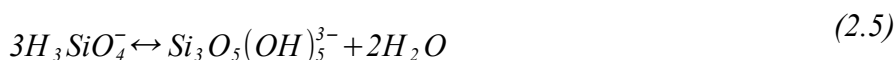
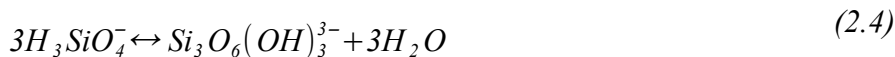
Pucolány jsou přírodní látky křemičité, hlinité nebo hlinitokřemičité, které se v alkalickém prostředí (0,05 g CaO v 1 l vody způsobuje nárůst pH na 11,1) během několika minut až hodin rozpouští za normální teploty a reagují s vápenatými kationty v pórové vodě za vzniku hydratovaných křemičitanů vápenatých (CSH), hydratovaných hlinitanů vápenatých (CAH), popřípadě hydratovaných hlinitokřemičitanů vápenatých (CASH), které jsou nerozpustné ve vodě. CSH, CAH popřípadě CASH jsou mezinárodně používané zkratky, kde C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃ a H = H₂O. Zdroje přírodních pucolánů jsou jílové minerály, živce, křemen, amorfni formy oxidu křemičitého a hlinitého apod. (Bérubé et al., 1990).

Při pH > 10,5 (Croft, 1964) se oxidy křemičité rozpouští za vzniku kyseliny ortokřemičité

(2.2).



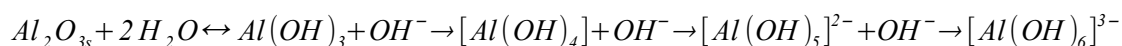
Ta je dobře rozpustná ve vodě, ale je nestálá, a proto kondenzuje na vysokopolymerní formy (2.3 – 2.9; Felmy et al., 2001).



Takto nově vzniklé polymery reagují s Ca^{2+} v pórové vodě za vzniku CSH.

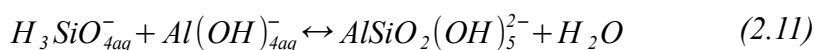
Při $pH > 10,9$ (Croft, 1964) se hydroxidy hlinité rozpouštějí za vzniku Lewisových kyselin, které mají volný vazebný orbital a mohou přijmout elektornový pár OH^- . Děje vyjadřuje schéma (2.10).

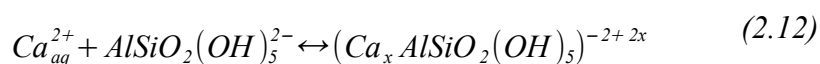
(2.10)



Takto rozpuštěné hydroxohlinitany reagují s Ca^{2+} v pórové vodě za vzniku CAH.

Při poklesu pH v důsledku spotřebování OH^- reagují ionty kyseliny ortokřemičité s tetrahydroxohlinitanovým iontem za vzniku hlinitokřemičitanových koloidů a gelů (2.11), které dále reagují s Ca^{2+} za vzniku CASH (2.12).



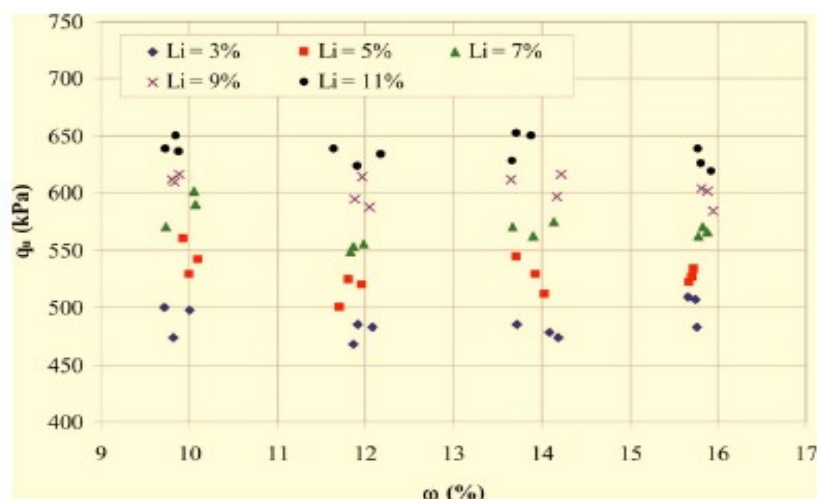


Reakce probíhají pomalu. Jejich rychlost závisí na množství přítomné vody, na množství a typu zastoupených silikátových minerálů a na typu vápna (Glenn a Handy, 1963). S klesající velikostí zrna silikátových minerálů a se zvyšujícím se stupněm zvětrání se reakce urychlují (Bérubé et. al, 1990). Při teplotách nižších než 13 - 16°C se pucolánové reakce výrazně zpomalují, naopak při narůstající teplotě se zrychlují (Arabi a Wild, 1986; Bell, 1996; Al-Mukhtar et. al, 2010b). Pucolánové reakce mohou trvat několik měsíců až let, dokud pH umožňuje rozpouštění oxidů křemičitého a hlinitého (Little, 1995) a dokud je dostatečné množství Ca^{2+} v pórové vodě. Eades a Grim (1966) zaznamenali nárůst pevnosti směsi jílu o nízké plasticitě s příměsí 2 – 8% $Ca(OH)_2$ s rostoucí dobou zrání (1 – 30 dnů) při teplotě 60°C, dokud pH směsi nekleslo pod hodnotou 11. Al-Mukhtar et al. (2010a) zaznamenali pokles elektrické konduktivity v důsledku spotřebovávání Ca^{2+} a OH^- nejen při kationtové výměně, ale i při pucolánových reakcích. Dokud byl pokles elektrické konduktivity s rostoucí dobou zrání měřitelný, autoři předpokládají, že pucolánové reakce probíhají.

Pucolánové reakce příznivě zlepšují geotechnické vlastnosti vápněných zemin, a to zejména jejich pevnost v prostém tlaku. K nárůstu pevnosti nepřispívá podle Clare a Cruchley (1957) jen vznik novotvořených minerálů, ale i vznik krystalů hydroxidu vápenatého při hydrataci vápna a krystalů uhličitanu vápenatého při karbonataci vápna. Pevnost rychleji roste za vyšších teplot během zrání směsi zeminy s vápnem, s čímž je nutno počítat v aridních oblastech. Již při 40°C pevnost směsi jílovité zeminy s různým množstvím vápna vzrostla dvakrát tak rychleji než tomu bylo při 20°C (Bell, 1996).

Nárůst pevnosti vápněné zeminy závisí na typu zastoupených jílových minerálů v zemině. Pevnost montmorilonitu s 2% CaO po 1 dni zrání vzrostla pouze z 320 kPa na 520 kPa, ale u stejně staré směsi kaolinitu s 2% CaO vzrostla z 300 kPa na 720 kPa (Bell, 1996). Dále pevnost roste s rostoucím množstvím vápna, rostoucí dobou zrání a s klesající pórovitostí vápněné zeminy (Consoli et al., 2009).

Consoli et al. (2009) stanovili na směsích jílu s nízkou plasticitou s 3 – 11% $Ca(OH)_2$ (Li) hutněných při vlhkostech 10%, 12%, 14% a 16% na stejnou objemovou hmotnost po 27 dnech zrání v klimatizované místnosti a 1 dni sycení ve vodě pevnost v prostém tlaku. Prokázali, že výsledné pevnosti nebyly ovlivněny vlhkostí zeminy (Obr. 2.2).



Obrázek 2.2 Vliv vlhkosti na pevnost v prostém tlaku (28 dní zrání, Consoli et al., 2009).

Přírůstky pevnosti s dobou zrání jsou podle Locat et al. (1990) pozorovatelné, pokud je dostatek materiálu potřebného na pucolánové reakce nebo pokud další vznik novotvořených minerálů nepřispívá k nárůstu pevnosti, neboť zemina už má vyvinutou rigidní strukturu. Přírůstek pevnosti v prostém tlaku s dobou zrání je rychlejší u vápněných zemin s nízkou pórovitostí. U vápněných zemin s vyšší pórovitostí musí vzniknout větší množství novotvořených minerálů, které spojí vzdálenější částice zeminy, aby došlo k významnému nárůstu pevnosti (Locat et. al, 1990). Proto nárůst pevnosti s rostoucí dobou zrání velmi závisí na energii zhutnění a na kvalitě promísení zeminy s vápnem (Bozbey a Garaisayev, 2010).

2.3 Novotvořené fáze

Novotvořené fáze (CSH, CAH, CASH) jsou produkty pucolánových reakcí. Tyto fáze mohou být amorfní nebo mohou mít až strukturu s vysokým stupněm krystalinity. Lze je detekovat diferenční termickou analýzou (Diamond et al., 1964; Arabi a Wild, 1986) nebo RTG difrakcí (Croft, 1964; Choquette et al., 1987; Al-Mukhtar et al., 2010a; Metelková et al., 2012) či je lze pozorovat skenovacím elektronovým mikroskopem (Arabi a Wild, 1986; Choquette et al., 1987). Množství novotvořených fází vyskytujících se ve směsi zeminy s vápnem roste s rostoucím množstvím přidaného vápna a s rostoucí dobou zrání (Al-Mukhtar et al., 2010a; Le Runigo et al., 2011).

2.3.1 Hydratované silikáty vápenaté

Jedná se o důležitou skupinu silikátových fází, jejichž struktura je při pokojové teplotě amorfní až s nízkým stupněm krystalinity a liší se stupněm silikátové polymerizace (Chen et. al, 2004). CSH vznikají nejčastěji na povrchu křemenů, živců a illitu (Croft, 1964; Diamond

et. al, 1964; Arabi a Wild, 1986; Choquette et. al, 1987; Bérubé et al., 1990; Bell, 1996) či montmorilonitu (Diamond et. al, 1964; Croft, 1964; Boardman et. al, 2001). Je známo přes 30 krystalických CSH fází (Taylor, 1997). Vyskytují se v gelové formě nebo mají lístkovitý, vláknitý nebo vrstevnatý charakter (Škvára, 2003). Charakteristickou vlastností CSH gelu je expanze při ponoření do vody. Tyto CSH fáze jsou podobné fázím, které vznikají hydratací trikalciium silikátu (C_3S) a dikalciium silikátu (C_2S) v portlandském cementu (Arabi a Wild, 1986).

2.3.2 Hydratované hlinitany vápenaté

CAH fáze krystalizují ve stabilních i metastabilních strukturách s hexagonální, pseudohexagonální nebo kubickou symetrií (Roberts, 1957). Nejčastěji se ve směsi zeminy s vápna vyskytují ve formě C_4AH_{19} , C_3AH_6 nebo C_3AH_{8-12} (Roberts, 1957). Ty však vlivem dehydratace vytvářejí velkou řadu polymerů (Roberts, 1957; Croft, 1964). CAH fáze vznikají nejčastěji v zemině s přítomností kaolinitu (Croft, 1964; Bell, 1996; Boardman et al., 2001).

2.3.3 Hydratované hlinitokřemičitany vápenaté

CASH fáze nejčastěji vznikají na povrchu silikátových minerálů především živců, biotitu, nefelinu (Choquette et al., 1987; Bérubé et al., 1990) či illitu (Wild et al., 1986). Mají vláknitou nebo destičkovitou strukturu (Bérubé et al., 1990).

2.4 Karbonatace vápna

Karbonatace vápna je jedním z fenoménů, který je spojen se zlepšováním zemin vápnem. Hydratované vápno, které má velmi nízkou rozpustnost (1,23 g v 1l vody při $T = 20^\circ C$), reaguje velmi snadno s oxidem uhličitým za vzniku mikrokrytalického nebo amorfního uhličitanu vápenatého o velikosti zrna okolo 1 μm již při pokojové teplotě (2.13; Moorehead, 1986).



Množství $CaCO_3$ narůstá s rostoucím množstvím vápna a s rostoucí dobou zrání (Arabi a Wild, 1986; Al-Mukhtar et al., 2010a).

Proces karbonatace vápna je pomalý a závisí na koncentraci oxidu uhličitého v okolním vzduchu, na jeho parciálním tlaku, relativní vlhkosti vzduchu (RH) a na teplotě. Je - li $RH < 50\%$ nebo $RH > 95\%$ nebo teplota kolem $60^\circ C$ (Moorehead, 1986), reakce probíhá velmi pomalu. Zprvu karbonatace probíhá na povrchu a po vytvoření uhličitanové vrstvy se

stává řídícím dějem difúze CO_2 pro celý karbonatační děj. Rychlost difúze CO_2 klesá s rostoucí tloušťkou uhličitanové vrstvy, ale roste se zvyšující se propustností hutněné vápněné zeminy (Moorehead, 1986).

3. Optimální množství vápna

Ve stavební praxi se velmi často používá pálené vápno k snížení vlhkosti upravované zeminy, což usnadní zpracování zeminy do zemního tělesa. 1% páleného vápna sníží vlhkost upravované zeminy v závislosti na atmosférických podmínkách o 1 – 2% (TP 94, 2013).

Pokud však chceme docílit maximální modifikace zeminy hlavně s ohledem na její plasticitu a únosnost, je nutno do zeminy dodat tzv. optimální množství vápna (OMV). OMV lze stanovit několika metodami, které jsou shrnuty v následujících odstavcích.

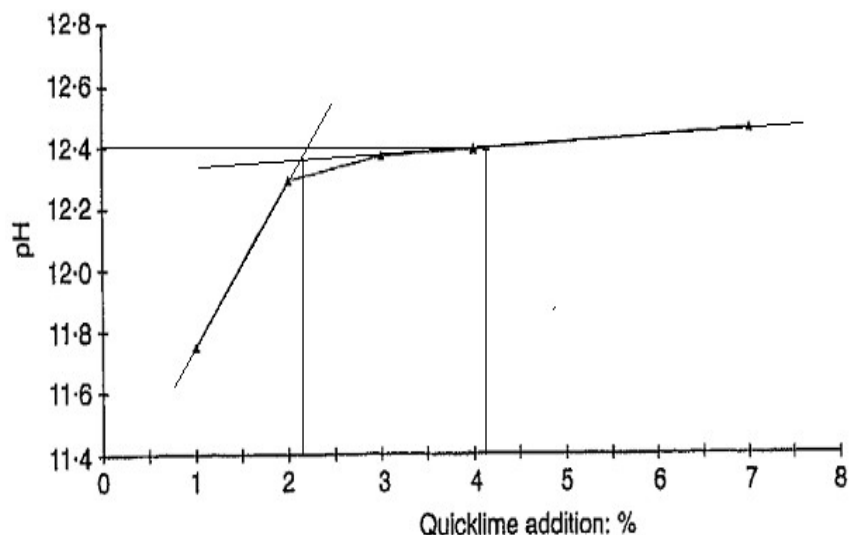
3.1 Stanovení OMV pomocí měření pH (ICL)

Eades a Grim (1966) vyjádřili OMV jako množství vápna, které zvyšuje pH zeminy na 12,4 po 1 hodině zrání. Postup měření je popsán v normě BS 1924 – 2 (1990) v kapitole 5.4 Determination of the initial consumption of lime (ICL). 20 g na vzduchu usušené zeminy prosáté sítím o velikosti oka 0,425 mm se smíchá v plastové a uzavíratelné lahvi s různým obsahem vápna a 100 ml destilované vody. Norma doporučuje použít 0,5%; 1%; 1,5%; 2%; 2,5%; 3%; 4%; 5% a 6% vápna. Směsi se 15 minut protřepou v třepačce a po 1 hodině se stanoví pH a teplota suspenzí pomocí pH metru. Pro získání reprodukovatelných výsledků musí být naměřená hodnota pH převedena na referenční teplotu 25°C podle rovnice (3.1).

$$pH_{25} = pH_T + 0,03 \cdot (T - 25) \quad (3.1)$$

Zeminy obsahující jednovalentní ionty např. Na^+ na povrchu jílových částic nedosahují $\text{pH} = 12,4$ ani po přidání 10% CaO . Na^+ se díky kationtové výměně s Ca^{2+} uvolňuje do pórové vody a měřící elektroda na jednovalentní ionty citlivě reaguje (Eades a Grim, 1966). Proto Rogers et al. (1997) doporučili inflexní bod křivky považovat za hledanou hodnotu ICL (Obr. 3.1), kterou doporučili ověřit stanovením OMV pomocí konzistenčních mezí.

McCallister a Petry (1990) použili pro stanovení OMV pomocí pH testu termín lime modification optimum (LMO). Toto označení se používá i v americké normě ASTM D 6276.



Obrázek 3.1 Výsledky ICL testu pro londýnský jíl (Rogers et al., 1997).

3.2 Stanovení OMV pomocí konzistenčních mezí (LFP)

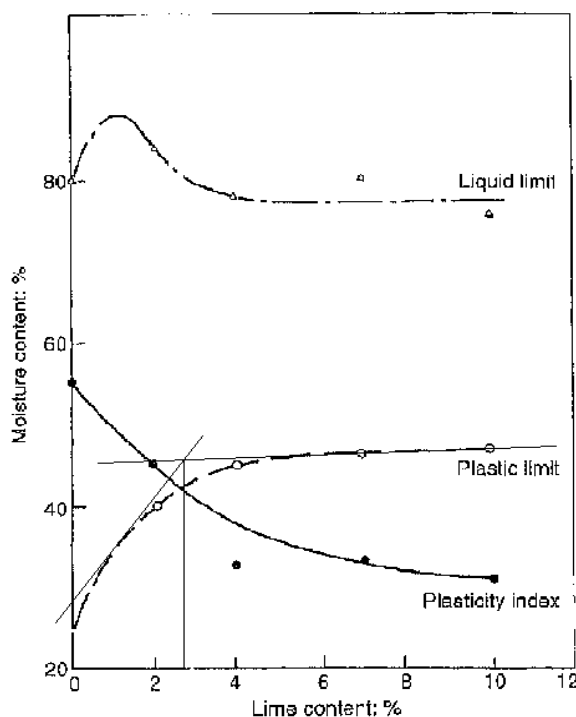
Hilt a Davidson (1960) stanovili OMV podle rovnice (3.2), kde je hodnota OMV přímo úměrná procentuálnímu zastoupení jílových částic menších než 0,002 mm. Autoři správnost rovnice (3.2) ověřili pouze na směsi montmorilonitického jílu s vápnem.

$$OMV[\%] = \frac{(\text{zastoupení jílových částic o } 0,002 \text{ mm} [\%])}{35} + 1,25 \quad (3.2)$$

Dále vyjádřili OMV jako množství vápna, které zajistí maximální nárůst w_p po 2 dnech zrání směsi zrající při teplotě 21°C a další nárůst množství vápna už nezpůsobí další změny w_p . Pro takto stanovené OMV použili termín lime fixation point (LFP). Aby však Hilt a Davidson (1960) mohli stanovit w_p u všech směsí, museli s rostoucím množstvím vápna zvyšovat obsah vody v dané směsi, aby získali homogenní pastu. Tím ale nebyly dodrženy stejné výchozí podmínky pro všechny směsi. Proto Eades a Grim (1966) stanovili LFP na základě měření I_p na směsi prachovité zeminy a na směsi jílu se střední až extrémní plasticitou s 1 – 9% Ca(OH)_2 po 1 hodině zrání. V tomto případě je LFP tedy takové množství vápna, při kterém se směs zeminy s vápnem stává neplastická a pH zeminy dosahuje hodnoty 12,4.

Rogers et al. (1997) doporučili stanovit hodnotu LFP z průběhu vlhkosti na mezi plasticity s rostoucím množstvím vápna po více než 6 hodinách zrání, respektive poté, kdy je ukončena kationtová výměna. Autoři však hodnotu LFP, respektive hodnotu ICL londýnského jílu ($w_L = 52\%$, $I_p = 33\%$) stanovili pomocí inflexního bodu křivky na hodnotu 2,8% CaO (Obr. 3.2), respektive 2,2% CaO (Obr. 3.1). Takto stanovené hodnoty jsou výrazně nižší než

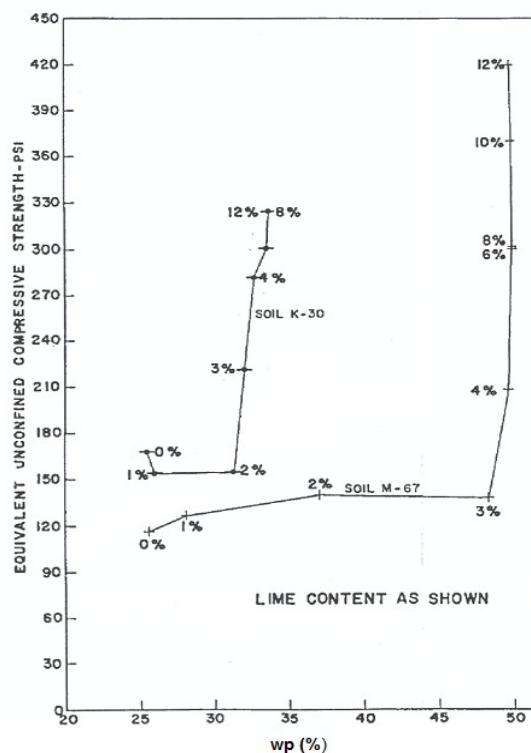
hodnoty ICL, respektive LFP stanovené podle doporučení Eadese a Grima (1966) na 4,2% CaO (Obr. 3.1), respektive na 4,7% CaO (Obr. 3.2). Rogers et al. (1997) předpokládají, že takto stanovené množství vápna je dostačující na vyvolání pucolánových reakcí. Avšak směs zeminy s vápnem pravděpodobně dosáhne nižší maximální hodnoty pevnosti v prostém tlaku než by dosáhla s vyšším množstvím vápna.



Obrázek 3.2 Vliv množství vápna na konzistenční meze londýnského jílu (Rogers et al., 1997).

3.3 Stanovení OMV pomocí měření pevnosti v tlaku (LSO)

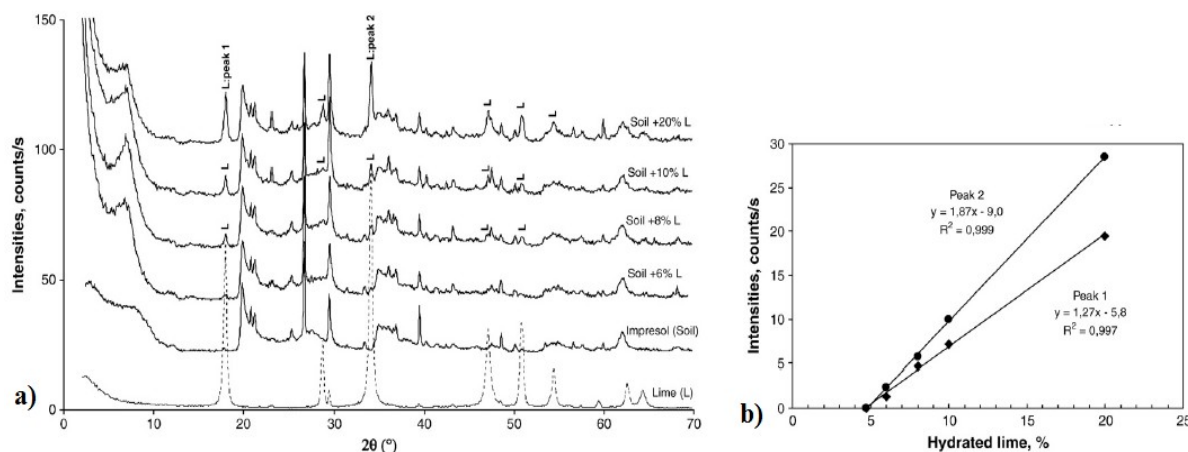
Hilt a Davidson (1960) stanovili na směsích zeminy s obsahem 67% jílových částic s převahou montmorilonitu (M-67) a s obsahem 30% jílových částic s převahou kaolinitu (K-30) s 0 – 12% Ca(OH)_2 pevnost v prostém tlaku po 28 dnech zrání při teplotě 21°C. Tu porovnali s hodnotou vlhkosti na mezi plasticity w_p stanovenou na směsích s 1%, 2%, 3%, 4%, 6%, 8%, 10% a 12% vápna po 2 dnech zrání (Obr. 3.3). OMV je v tomto případě množství vápna, po jehož překročení významně narůstá pevnost směsí avšak bez výrazné změny w_p . McCallister a Petry (1992) pojmenovali tuto hodnotu lime stabilization optimum (LSO).



Obrázek 3.3 Závislost meze plasticity na pevnosti v prostém tlaku na 2 typech jílovitých zemin upravených vápnem (Hilt a Davidson, 1960; upraveno).

3.4 Další možnosti stanovení OMV

Al-Mukhtar et al. (2010a) sledovali pomocí RTG difrakce změnu intenzity záznamu nespotřebovaného vápna ($2\theta = 18^\circ$ a $34,1^\circ$, peak 1, respektive 2 na obrázku 3.4a) u směsi bentonitu ($w_L = 235\%$, $I_p = 180\%$) s 6%, 8%, 10% a 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ po 1 dni zrání (Obr. 3.4b).



Obrázek 3.4 a) Záznam RTG difrakce hydratovaného vápna, neupraveného bentonitu a směsi bentonitu s 6, 8, 10 a 20% hydratovaného vápna po 1 dni zrání b) Vývoj intenzity dvou hlavních píků nespotřebovaného vápna po jednom dni zrání pro různá množství vápna přidávaných do jílu s extrémní plasticitou (Al-Mukhtar, et. al, 2010a).

Nespotřebované vápno odpovídá té části vápna, která byla přidána do zeminy, ale nezreagovala s jílovými minerály. Intenzita záznamu nespotebovaného vápna roste s rostoucím množstvím přidaného vápna. Závislost intenzity záznamů nespotebovaného vápna na celkovém množství přidaného vápna je statisticky významná s koeficientem korelace 0,99 (Obr. 3.4b). OMV zde odpovídá hodnotě 4,7% Ca(OH)_2

Dále měřili koncentraci Ca^{2+} v roztoku 0,5 g suchého bentonitu s 40 ml destilované vody s 4%, 6%, 10% a 20% Ca(OH)_2 po jednom dni zrání při teplotě 20°C pomocí atomové adsorpční spektrometrie. Koncentrace volných vápenatých iontů v roztoku odpovídá množství nespotebovaného vápna. Po 1 dni zrání autoři zjistili, že 3,6%; 4,7%; 5,1% a 5,3% vápna bylo spotřebováno při přimíchání 6%, 8%, 10% respektive 20% vápna. Hodnotu OMV stanovili jako nejvýše dosaženou hodnotu spotřebovaného vápna tj. 5,3%.

Al-Mukhtar et al. (2010a) stanovili 5% vápna jako OMV studovaného bentonitu.

4. Hydraulická vodivost a pórovitost upravených zemin vápnem

Na základě experimentálního měření Darcy definoval průtok q celkovou plochou A vztahem (4.1)

$$q = k \cdot A \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (4.1),$$

kde k [m/s] je hydraulická vodivost a poměr $\Delta H/\Delta L$ je označován jako hydraulický gradient. Hydraulická vodivost je primárně ovlivněna pórovitostí zeminy. Již Terzaghi (1925) prokázal, že se snižující se pórovitosti zeminy se snižuje hydraulická vodivost zeminy. Zemina s velkými póry nebo s poruchami, mikrotrhlinami, laminací či ččkami písku významně zvyšuje pórovitost, a tedy zvyšuje hydraulickou vodivost. Pórovitost n porézních materiálů lze vypočítat dle mechaniky zemin podle vzorce (4.2)

$$n = \frac{V_{pior}}{V_t} \quad (4.2),$$

kde V_{pior} je celkový objem pórů a V_t je celkový objem zeminy.

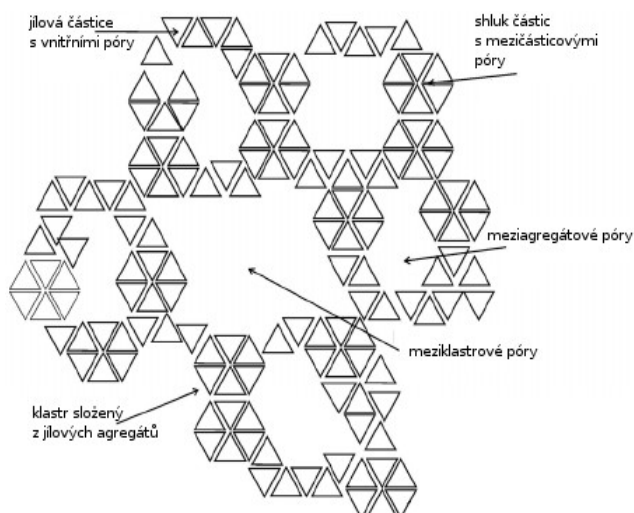
Pórovitost zeminy však neumožňuje prognózovat její hydraulickou vodivost. Záleží především na tvaru, objemu a prostorovém uspořádání pórů a na možnosti vzájemné komunikace mezi póry. Klasifikace pórů podle velikosti není zcela snadná, protože póry mají rozličné tvary. Pro zjednodušení Rouquerol et. al (1994) a Kaneko (1994) roztřídili póry na základě podobnosti s následujícími geometrickými tvary: válec, inkoustová lahvička, kužel a destička. Vzhledem k velké tvarové různorodosti pórů existuje v literatuře mnoho systémů třídění velikosti pórů, které se navzájem značně liší a v některých případech si i odporují

(Zdravkov et al., 2007).

V literatuře (Kodikara et al., 1999; Locat et al., 1996; Quang a Chai, 2015) se lze setkat s klasifikací pórů, která dělí póry na základě jejich původu a struktury na vnitřní (intraparticle pores), mezičásticové (interparticle or intra-aggregate pores), meziagregátové (inter-aggregate pores) a meziklastrové (intercluster pores, Tab. 4.1, Obr. 4.1).

Tabulka 4.1 Klasifikace pórů podle Kodikara et al. (1999).

póry	průměr d (μm)
vnitřní (intraparticle pores)	< 0,025
mezičásticové (interparticle or intra-aggregate pores)	0,025 - 1
meziagregátové (inter-aggregate pores)	1 - 30
meziklastrové (intercluster pores)	10 - 1000



Obrázek 4.1 Strukturní elementy a typy pórů (Kodikara et al., 1999).

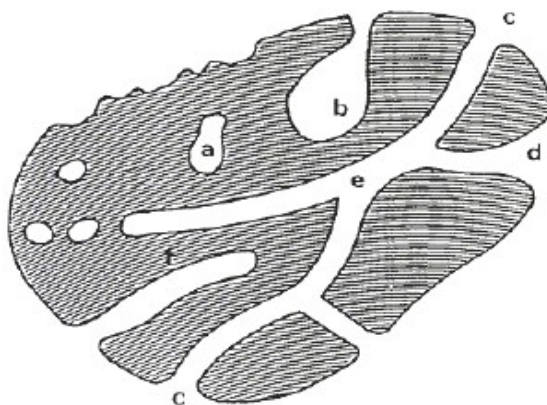
Pro sjednocení charakterizace porézních materiálů je však obecně používaný modelový systém IUPAC založený na mechanismu sorpčních jevů (Tab. 4.2).

Tabulka 4.2 Klasifikace pórů podle IUPAC.

póry	průměr d (μm)
mikropóry	< 0.002
mezopóry	0.002 – 0.05
makropóry	0.05 – 7.5
hrubé póry	> 7.5

Kodikara et al. (1999) klasifikovali póry podle dostupnosti pro kapalinu (Obr. 4.2)

na otevřené (b, c, d, e, f) a uzavřené (a). Podle Rouquerol et. al (1994) nejsou uzavřené póry přístupné pro molekuly a ionty kapaliny, ale podle Ruike et al. (1994) jsou uzavřené póry ty, jejichž šířka je menší než velikost molekuly použitého média. Uzavřené póry ovlivňují hlavně pevnost a objemovou hmotnost zeminy, ale nemají vliv na hydraulickou vodivost zeminy. Otevřené póry jsou dostupné pro ionty a molekuly kapaliny jen z jedné strany póru (slepé póry, b, f) nebo z obou konců póru (průběžné póry, e) a ovlivňují hydraulickou vodivost zeminy.

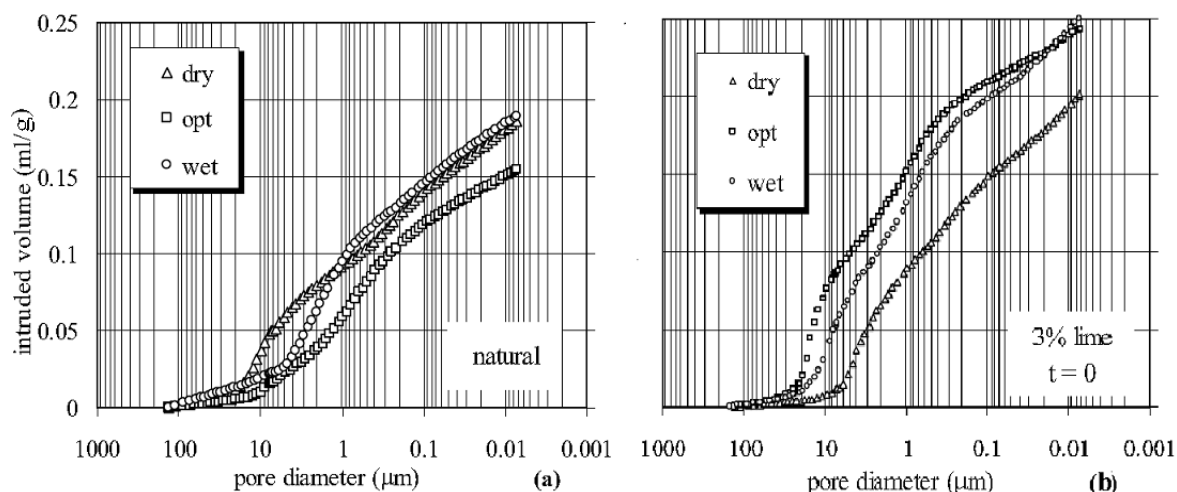


Obrázek 4.2 Schématické rozdělení pórů vzhledem k jejich dostupnosti pro kapalinu, upraveno podle IUPAC (Kodikara et al., 1999).

Pórovitost a zastoupení jednotlivých velikostí pórů v zemině lze zásadně změnit přimísením vápna, které vyvolá flokulaci jílových částic. Intenzita změny struktury vápněné zeminy závisí na její vlhkosti (Russo et al., 2007; Le Runigo et al., 2009), na množství a typu zastoupených jílových částic (Lambe, 1954; Mitchell, 1976; Kenney et al., 1992; Benson et al., 1994), na množství použitého vápna (McCallister a Petry, 1992; Locat et al., 1996; Quang a Chai, 2015) a na okolní teplotě (Wild et al., 1987). Dále lze pórovitost ovlivnit správnou volbou hutnícího zařízení a hutnící energií (Mitchell et al., 1965; Cuisinier et al., 2011). Pokud vysoké pH, dostatek volných iontů Ca^{2+} , přítomnost silikátových minerálů a teplota nad 16°C umožní dlouhodobý průběh pucolánových reakcí, mohou novotvořené minerály způsobit změnu zastoupení jednotlivých velikostí pórů ve vápněné zemině s rostoucí dobou zrání (Choquette et al., 1987; Le Runigo et al., 2009; Metelková et al., 2012). Změny pórovitosti a změny zastoupení velikostí pórů v zemině vlivem vápna jsou v literatuře sledovány pomocí rtuťové porozimetrie (kapitole 6.1 ; Choquette et al, 1987; Russo et al., 2007; Le Runigo et al., 2009; Cuisinier et al., 2011; Quang a Chai, 2015). Dopad těchto změn na hydraulickou vodivost zeminy je shrnut v následujících odstavcích.

4.1 Vliv přirozené vlhkosti zeminy na pórovitost a distribuci pórů

Russo et al. (2007) ručně smísili vysušenou prachovitou zeminu ($w_L = 25\%$, $I_P = 8\%$) s 0% a 3% CaO (mělo zajistit vývoj pucolánových reakcí) a destilovanou vodou. Po 24 hodinách zrání byla směs zhutněna energií Proctor standard při optimální vlhkosti w_{opt} a při vlhkosti „ w_{dry} “ $< w_{opt}$ a při vlhkosti „ w_{wet} “ $> w_{opt}$. Vlhkosti „ w_{dry} “ a „ w_{wet} “ zvolili autoři tak, aby směsi po zhutnění dosáhli podobných suchých objemových hmotností. Po 0 – 28 dnech zrání byly vzorky po 24 hodin sušeny v lyofilizátoru a podrobeny zkoušce MIP.



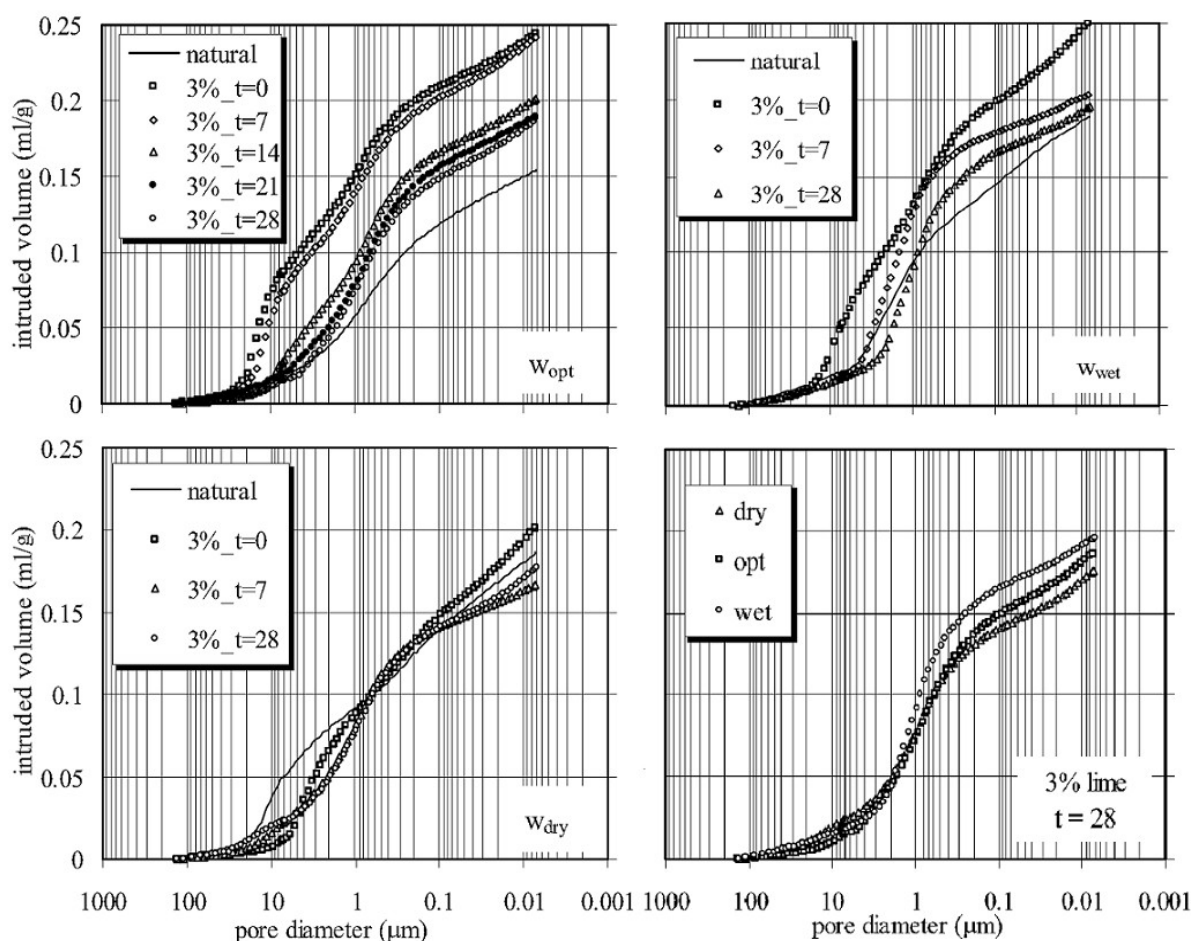
Obrázek 4.3 Kumulativní křivky MIP měřené na směsi prachovité zeminy s a) 0% a b) 3% CaO hutněné při w_{opt} , „ w_{dry} “ a „ w_{wet} “ a po 0 dnech zrání (Russo et al., 2007).

Neupravený vzorek hutněný při w_{opt} měl pórovitost n_{MIP} 21,4%. Tento vzorek měl nejvyšší suchou objemovou hmotnost, proto dosáhl nejnižší hodnoty celkového objemu vtlačené rtuti (Obr. 4.3 a). V této zemině byly nejvíce zastoupeny póry o průměru 1 μm . Neupravená zemina hutněná při „ w_{dry} “ měla podobnou pórovitost n_{MIP} jako neupravená zemina hutněná při „ w_{wet} “.

Ihned po přidání 3% CaO do zeminy se zvýšila pórovitost o cca 33% pro w_{opt} , respektive o 16% pro „ w_{wet} “ ve srovnání s pórovitostí pro vápnem neupravenou zeminu o dané vlhkosti (Obr. 4.3 b). K nárůstu pórovitosti přispěl významný nárůst zastoupení pórů o průměru 15 μm a mírný nárůst zastoupení pórů o průměru mezi 6 – 0,3 μm pro w_{opt} a významný nárůst pórů o průměru 10 μm a mírný nárůst zastoupení pórů o průměru mezi 3 – 0,3 μm pro „ w_{wet} “. Naopak u zeminy hutněné při „ w_{dry} “ došlo vlivem vápna k poklesu zastoupení pórů o průměru 10 - 3 μm .

S dobou zrání však objem pórů o průměru 15 μm ve vápněné zemině hutněné při w_{opt} a objem pórů o průměru 10 μm ve vápněné zemině hutněné při „ w_{wet} “ se snížil, což způsobilo pokles

její pórovitosti (Obr. 4.4). U vápněné zeminy hutněné při „ w_{dry} “ nedošlo s rostoucí dobou zrání k významné změně pórovitosti n_{MIP} , pouze poklesl objem pórů o průměru 3 – 0,3 μm . Po 28 dnech zrání dosáhly však vápněné zeminy podobné pórovitosti a distribuce pórů bez ohledu na vlhkost, při kterých byly hutněny (Obr. 4.4).

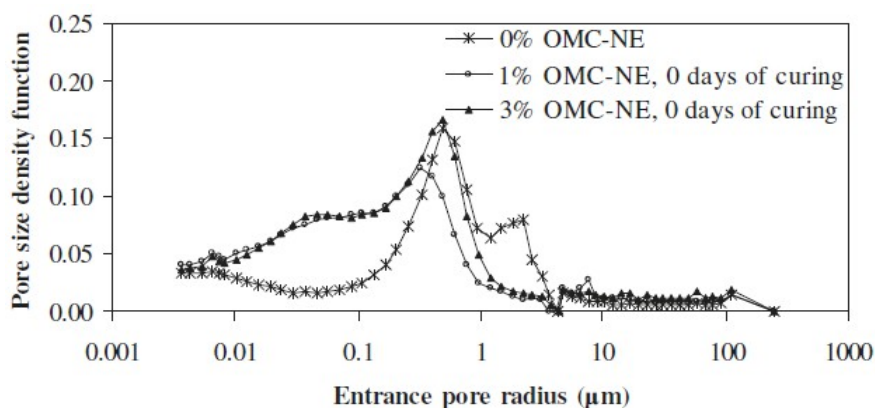


Obrázek 4.4 Kumulativní křivky MIP měřené na směsi prachovité zeminy s 3% CaO hutněné při w_{opt} , „ w_{dry} “ a „ w_{wet} “ po 0 – 28 dnech zrání (Russo et al., 2007).

Le Runigo et al. (2009) smísili vlhkou prachovitou zeminu ($w_L = 37\%$, $I_p = 18,3\%$) s 1% (OMV) a 3% CaO a po 1 hodině zrání ji zhutnili po 10 ti vrstvách do mozdíře o výšce 100 mm a průměru 50 mm (použili stejné mini hutnící zařízení jako Feber et al. (2008)). Směsi byly hutněny při optimální vlhkosti (OMC), při $w_{opt}+3\%$ (WMC) a při $w_{opt}-3\%$ (DMC) hutnící energií Proctor standard (NE). Po 0, 7, 15 a 25 dnech zrání byly vzorky sušeny v lyofilizátoru a podrobeny zkoušce MIP.

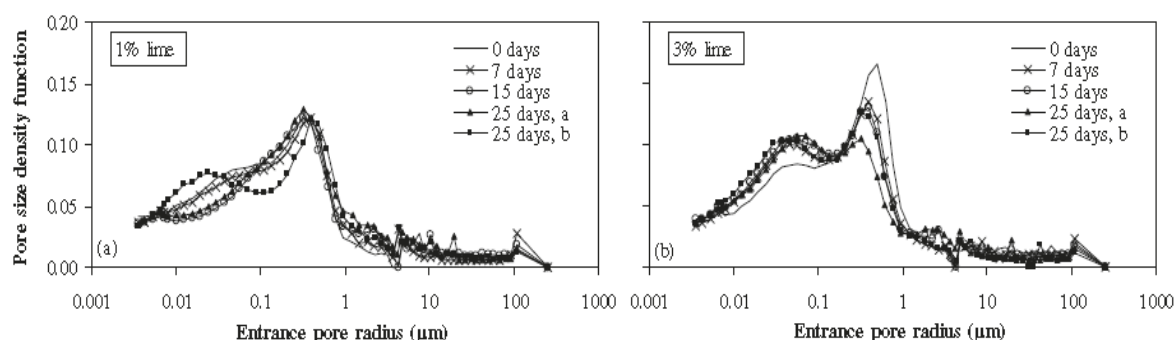
Přimícháním 1% vápna do zeminy o optimální vlhkosti ihned klesla maximální suchá objemová hmotnost zeminy z 1,76 Mg/m^3 na 1,66 Mg/m^3 a u zeminy s 3% vápna na hodnotu 1,60 Mg/m^3 . Pokles suché objemové hmotnosti zeminy autoři připisují významnému nárůstu počtu pórů o poloměru 0,01 – 0,2 μm , což je důsledkem flokulace jílových částic vlivem

vápna. Ale rostoucí množství vápna významně neovlivnilo množství těchto pórů (Obr. 4.5).



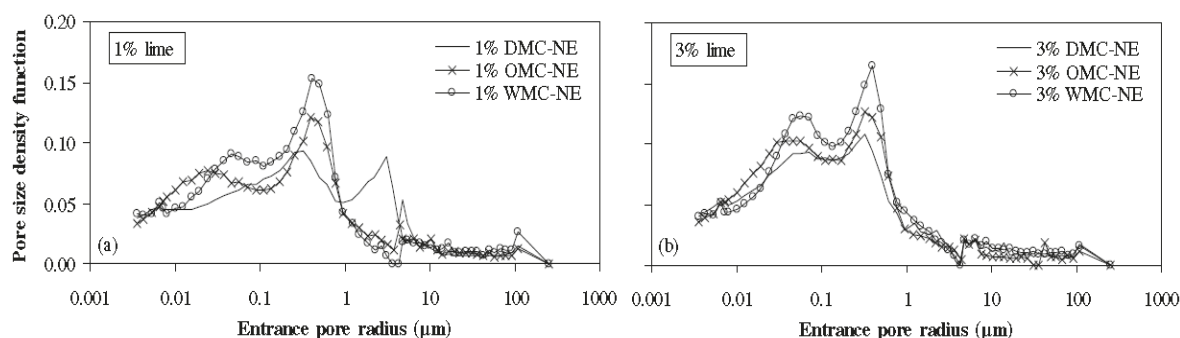
Obrázek 4.5 Distribuce pórů zeminy neupravené a upravené 1% a 3% CaO po 0 dnech zrání.

Na obrázku 4.6 je zobrazena distribuce pórů směsi zeminy s 1% a 3% CaO po 0, 7, 15 a 25 dnech zrání. U zeminy s 1% CaO se s dobou zrání zastoupení pórů významně neměnilo. U zeminy s 3% CaO se s rostoucí dobou zrání snížil objem pórů o poloměru 0,1 – 1 μm a rostl objem pórů o poloměru 0,01 – 0,1 μm, což autoři přisuzují tvorbě portlanditu a novotvořených fází.



Obrázek 4.6 Distribuce pórů zeminy s (a) 1% CaO a (b) 3% CaO hutněné energií Proctor standard při optimální vlhkosti stanovená při různých dobách zrání (Le Runigo et al., 2009).

Po 25 dnech zrání při teplotě 20°C bylo na vápněných vzorcích hutněných při OMC, WMC a DMC hutnicí energií Proctor standard (NE) stanovena distribuce pórů zeminy (Obr. 4.7). Objem pórů o poloměru 0,01 – 0,2 μm ve vápněné zemině hutněného při DMC je nižší než objem těchto pórů u vápněné zeminy s vlhkostí WMC. Dále jsou u vzorku s 1% CaO hutněného při DMC nejvíce zastoupeny póry o poloměru 1 – 7 μm, jejichž množství se významně sníží s rostoucí vlhkostí zeminy. Naopak objem pórů o poloměru 0,1 – 1 μm roste s rostoucí vlhkostí. U zemin s 3% CaO nemá rostoucí vlhkost vliv na distribuci pórů, pouze na nárůst objemu pórů o poloměru 0,05 μm a 0,4 μm.



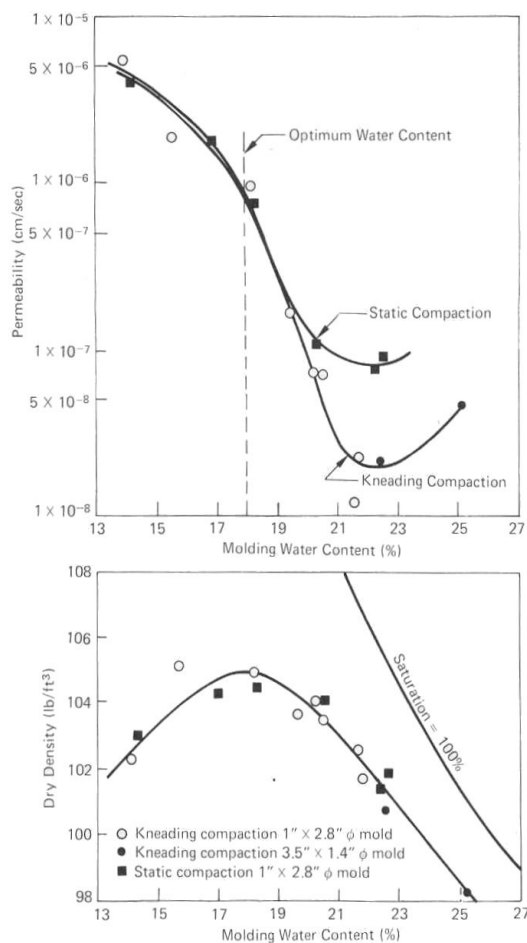
Obrázek 4.7 Distribuce pórů zemin s a) 1% CaO a b) 3% CaO hutněných energií Proctor standard (NE) při různých vlhkostech (DMC, OMC, WMC; Le Runigo et al., 2009).

4.2 Vliv způsobu hutnění na pórovitost a hydraulickou vodivost

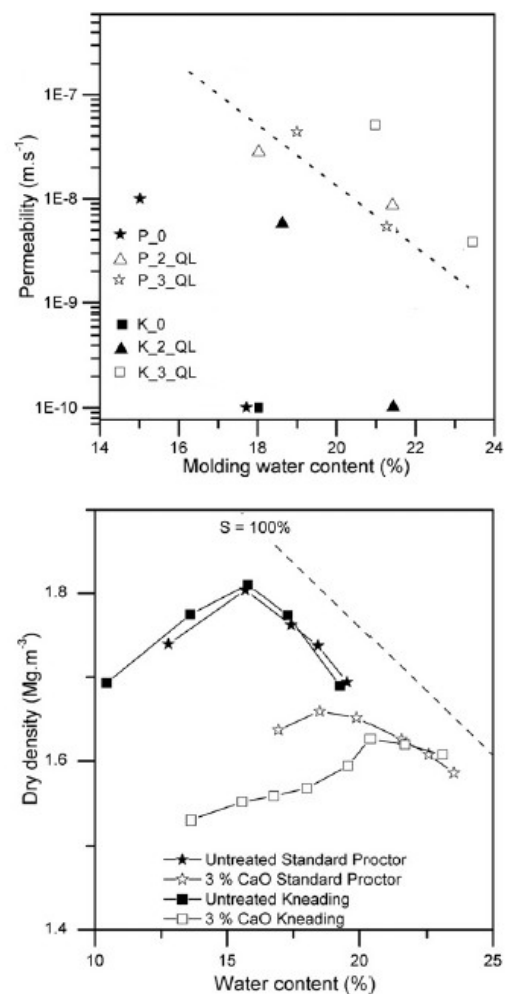
Na obrázku 4.8 je zobrazena závislost hydraulické vodivosti prachovitého jílu ($w_L = 37\%$, $I_p = 14\%$) na struktuře zeminy, kterou lze ovlivnit způsobem hutnění. Prachovitý jíl byl hutněn statickým a ježkovým válcem při různých vlhkostech. Zemina s vlhkostí $w < w_{opt}$ měla strukturu tvořenou shluky zrn, mezi nimiž jsou velké póry částečně vyplněny vodou a částečně vzduchem. Zrna ve shlucích jsou udržována pomocí kapilárních sil, které při hutnění zabrání přeuspořádání zrn. Zemina s touto vlhkostí je nejpropustnější. Hydraulická vodivost zeminy hutněné při vlhkosti $w > w_{opt}$ klesá s rostoucí vlhkostí při vlhkosti $w_{opt} + 4\%$ dosahuje v závislosti na způsobu hutnění o dva až tři řády nižší hydraulické vodivosti než zemina hutněná při $w < w_{opt}$. Při $w > w_{opt} + 4\%$ již zeminu nebylo možné kvalitně zhutnit, proto hydraulická vodivost zeminy opět roste. U zeminy s vlhkostí $w < w_{opt} + 2\%$ způsob hutnění zeminy neměl zásadní vliv na výslednou hodnotu hydraulické vodivosti. Avšak u zeminy s $w > w_{opt} + 2\%$ hutněné ježkovým válcem byla naměřena o téměř řád nižší hydraulická vodivost než u zeminy hutněné statickým válcem. Při hutnění ježkovým válcem dochází k větším smykovým přetvořením a vytváří se struktura, kde jsou zrna více usměrněna. Póry zeminy mají menší rozměry a postupně jsou vyplněny vodou.

Cuisinier et al. (2011) prokázali stejné chování i u vápněné prachovité zeminy. Navlhčenou prachovitou zeminu ($w_L = 32,5\%$, $I_p = 12,7\%$) mísili pomocí mixéru s 0%, 2% a 3% CaO po dobu 5 - ti minut. Takto připravená směs byla po 1 hodině zrání zhutněna energií Proctor standard (P) do formy o průměru 101 mm nebo metodou (K) navrženou Kouassi et al. (2000), která v laboratoři simuluje hutnění zeminy ježkovým válcem („kneading“, forma průměru 150 mm, 8 úderů na vrstvu, suchá objemová hmotnost stejná jako při metodě P). Po 28 dnech zrání při teplotě 20°C na tělesech o optimální vlhkosti (OMC) nebo vlhkosti $1,2 \cdot \text{OMC}$ byla stanovena hydraulická vodivost. Poté byly ze zkušebních těles odebrány vzorky, které byly

sušeny po dobu 24 hodin v lyofilizátoru a podrobeny měření v rtuťovém porozimetru.



Obrázek 4.8 Vliv způsobu hutnění na hydraulickou vodivost prachovitého jílu (Mitchell, 1976).

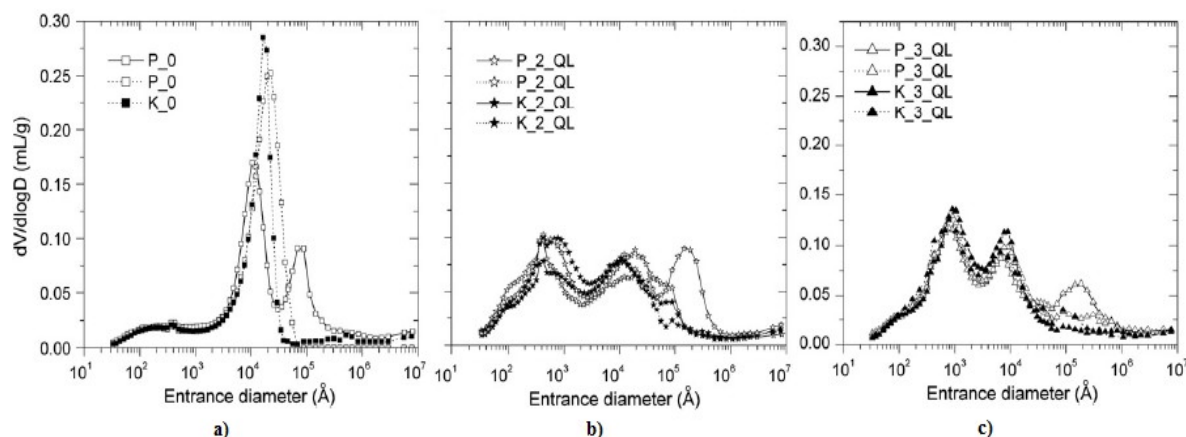


Obrázek 4.9 Vliv způsobu hutnění na hydraulickou vodivost směsi prachovité zeminy s 2% a 3% CaO(QL) po 28 dnech zrání (Cuisinier et al., 2011, upraveno).

U neupravené zeminy s vlhkostí $1,2 \cdot \text{OMC}$ hutněné metodou P nebo K byla hydraulická vodivost o 2 řády nižší než u zeminy s vlhkostí OMC hutněné metodou P (Obr. 4.9). Tuto skutečnost vysvětlují autoři rozdílným zastoupením pórů v zemině. U zemin s 0% CaO hutněných metodou P při OMC se vyskytla dvojí velikost pórů o průměru v rozmezí $0,1 - 3 \mu\text{m}$ a $3 - 100 \mu\text{m}$, naopak u zemin hutněných při $1,2 \cdot \text{OMC}$ metodou P nebo K se vyskytly póry o průměru v rozmezí $0,1 - 30 \mu\text{m}$ (Obr. 4.10 a).

Přimícháním vápna do zeminy hutněné při OMC i $1,2 \cdot \text{OMC}$ vzrostla hydraulická vodivost (Obr. 4.9). Vápněná zemina hutněné při OMC ($1,2 \cdot \text{OMC}$) metodou K dosáhly nižší hydraulické vodivosti než vápněná zemina hutněné při OMC ($1,2 \cdot \text{OMC}$) metodou P.

Přidáním vápna do zeminy se v hutněné směsi bez ohledu na použitou metodu hutnění nebo na vlhkost formovaly malé póry o průměru pod $0,3\ \mu\text{m}$ (Obr. 4.10 b, c), kterým autoři přisuzují pokles suché objemové hmotnosti zeminy.



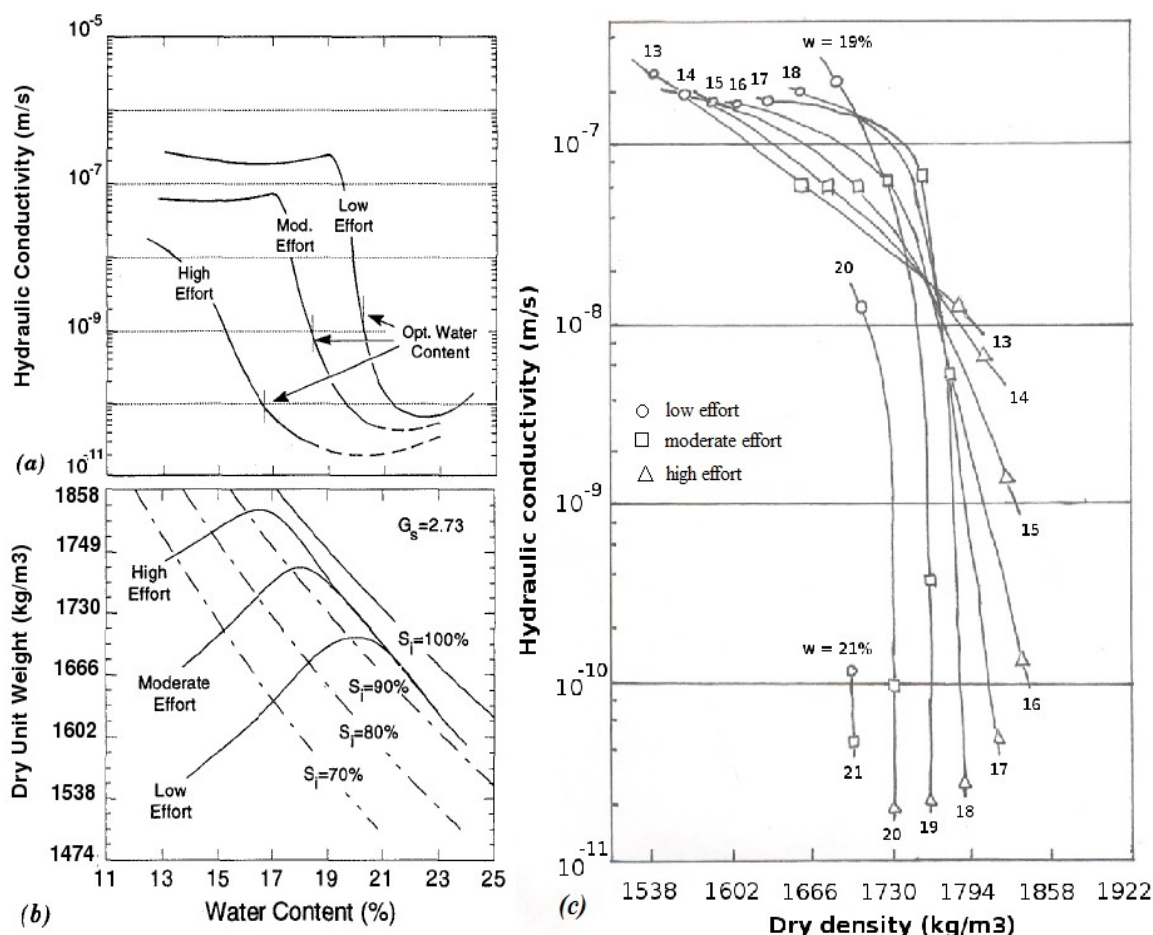
Obrázek 4.10 Distribuce pórů zeminy s a) 0%, b) 2% a c) 3% CaO (QL) hutněné energií P nebo K při OMC (plná čára) a při $1,2 \cdot \text{OMC}$ (čárkovaná čára) (Cusinier et al., 2011).

Zemina s vápnem hutněná metodou P při OMC má trimodální průběh distribuce pórů, tzn. velké póry o průměru nad $3\ \mu\text{m}$, střední póry o průměru $0,3 - 3\ \mu\text{m}$ a malé póry o průměru pod $0,3\ \mu\text{m}$. U vápněné zeminy hutněné metodou P při $1,2 \cdot \text{OMC}$ a hutněné metodou K při OMC a $1,2 \cdot \text{OMC}$ byly zjištěny pouze malé a střední póry (Obr. 4.10 b, c). Výskyt malých a středních pórů ve vápněné zemině není závislý na způsobu hutnění a ani na množství vody při hutnění. Naopak je tomu u zastoupení velkých pórů o průměru nad $3\ \mu\text{m}$, jejichž výskyt je jeden z hlavních faktorů, který ovlivňuje hydraulickou vodivost vápněné zeminy.

Tato studie prokázala, že i u vápněné prachovité zeminy lze dosáhnout hydraulické vodivosti nižší než $1 \cdot 10^{-9}$ m/s, pokud je vhodně zvolen obsah vody v zemině a způsob hutnění.

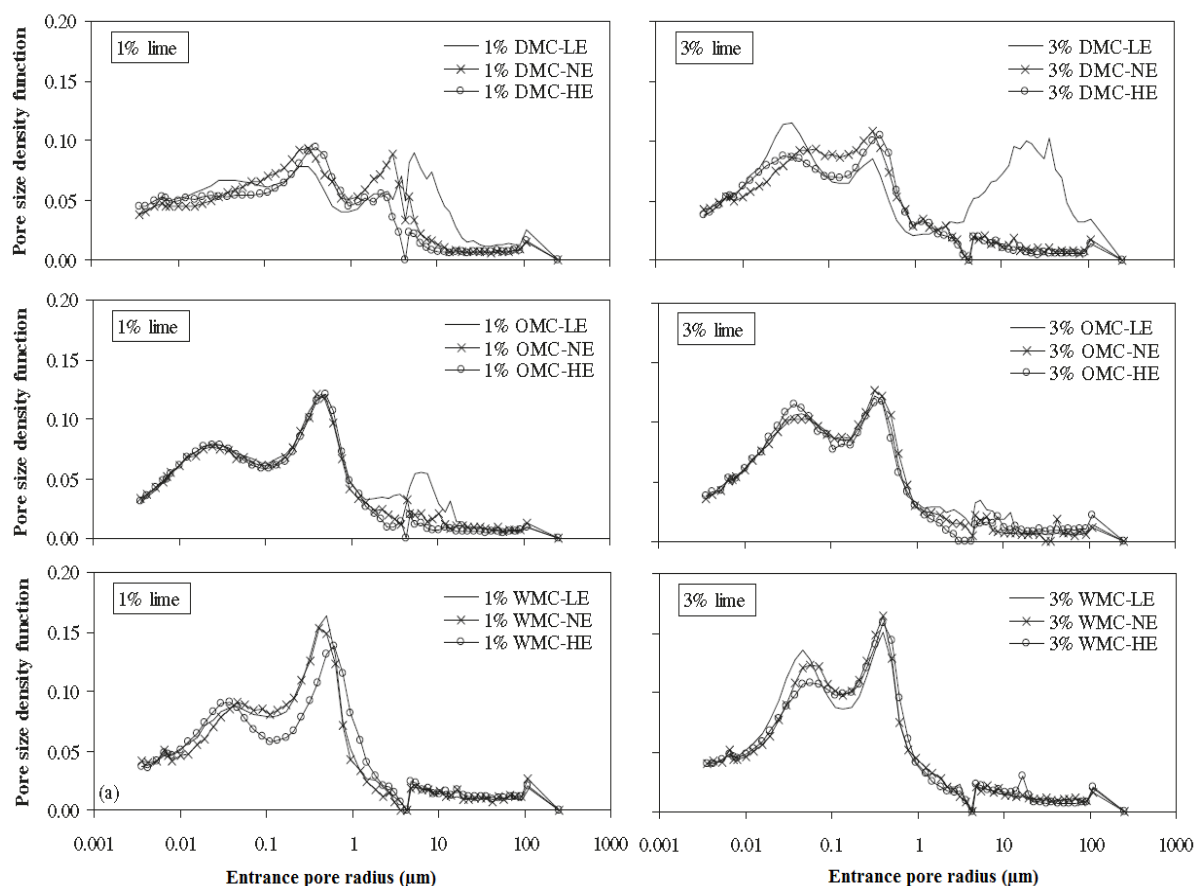
4.3 Vliv hutní energie

Na obrázku 4.11 a) lze vidět závislost hydraulické vodivosti prachovitého jílu ($w_L = 37\%$, $I_p = 14\%$) na struktuře zeminy, kterou lze ovlivnit hutnicí energií. Prachovitý jíl byl hutněn třemi různými hutnicími energiemi při různých vlhkostech. Při vlhkostech zeminy do 18% roste suchá objemová hmotnost zeminy s rostoucí hutnicí energií (Obr. 4.11 c), což má za následek snížení množství cest, kterými proudí voda. Proto zeminy hutněné při podobných vlhkostech různou hutnicí energií mohou dosahovat hydraulických vodivostí lišících se o 1 až 3 řády. Při vlhkostech zeminy nad 18% hydraulická vodivost klesá s rostoucí hutnicí energií, i když suchá objemová hmotnost zeminy zůstává nezměněna (Obr. 4.11 c). Zemina dosahuje nejnižší hydraulické vodivosti při vlhkosti kolem $w_{\text{opt}} + 2-4\%$.



Obrázek 4.11 (a) Hydraulická vodivost prachovitého jílu při 100% nasycení (b) hutněných při 3 různých hutnících energiích. (c) Závislost hydraulické vodivosti prachovitého jílu hutněného různými energiemi na suché objemové hmotnosti (data překreslena z grafu a), Mitchell et al., 1965).

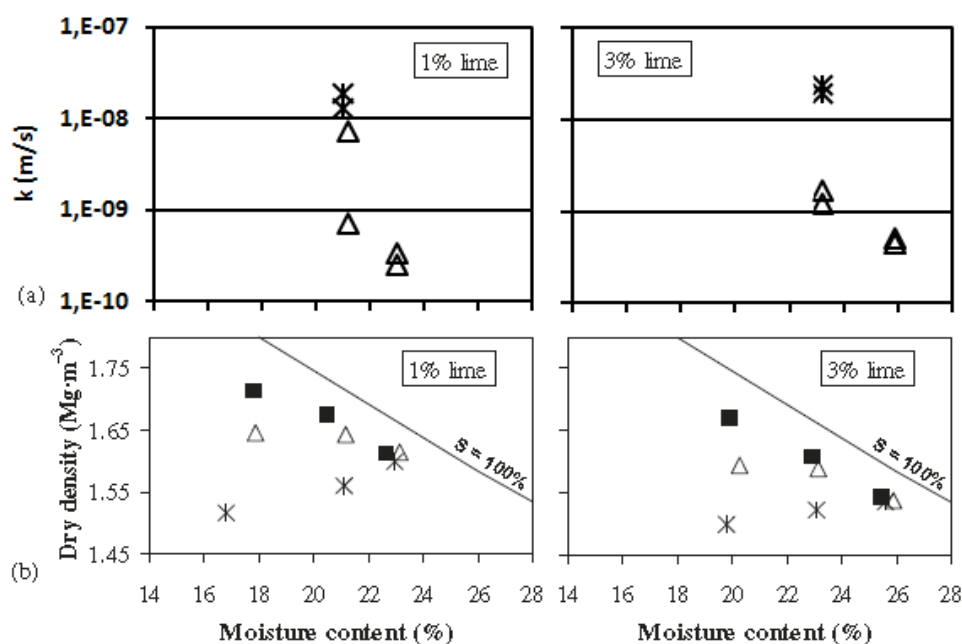
Le Runigo et al. (2009) prokázali stejné chování i u vápněných zemin. Smísili prachovitou zeminu ($w_L = 37\%$, $I_p = 18,3\%$) s 1% (OMV) a 3% CaO a po 1 hodině zrání ji zhutnili po 10 ti vrstvách do moždíře o výšce 100 mm a průměru 50 mm. Směsi byly hutněny při optimální vlhkosti (OMC), při $w_{opt}+3\%$ (WMC) a při $w_{opt}-3\%$ (DMC) hutnící energií Proctor standard (NE), 50% NE (LE) a 150% NE (HE). Po 25 dnech zrání při teplotě $20^\circ C$ byla stanovena pomocí rtuťové porozimetrie distribuce pórů (Obr. 4.12). Je patrné, že rostoucí hutnící energie nemá vliv na zastoupení pórů o poloměru mezi $0,01 - 0,2 \mu m$, avšak snižuje počet pórů o poloměru nad $1 \mu m$ a to hlavně u zeminy s 1% CaO hutněné při vlhkosti DMC a OMC a zeminy s 3% CaO hutněné při vlhkosti DMC.



Obrázek 4.12 Vliv hutnící energie na distribuci pórů zeminy s 1% CaO a 3% CaO hutněné při různých vlhkostech (DMC, OMC, WMC; Le Runigo et al., 2009).

Naopak póry o poloměru nad 1 μm u vápněných zemin hutněných při vlhkosti WMC tak citlivě nereagují na rostoucí hutnící energii. To je pravděpodobně důvod, proč suchá objemová hmotnost roste vlivem rostoucí hutnící energie u vápněné zeminy s vlhkostí DMC. Avšak vliv hutnící energie na suchou objemovou hmotnost klesá s rostoucí vlhkostí zeminy (Obr. 4.13 b).

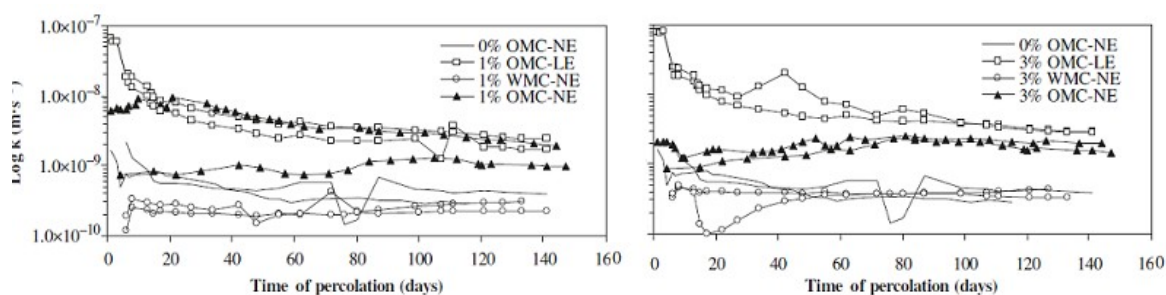
Dále na vzorcích OMC-LE, OMC-NE a WMC-NE upravených 1% nebo 3% CaO a na neupraveném vzorku OMC-NE stanovili hydraulickou vodivost po 7 dnech proudění vody zkušebními vzorky (Obr. 4.13 a). Variabilitu hydraulické vodivosti u vzorků OMC-NE s 1% CaO autoři připisují lišícímu se zastoupení pórů (vzorky „a“ a „b“ na Obr. 4.6 a). Přestože neupravená zemina hutněná při OMC 100% energií Proctor standard (NE) má výrazně vyšší suchou objemovou hmotnost ($1,76 \text{ Mg/m}^3$) než zemina upravená 3% CaO ($1,59 \text{ Mg/m}^3$; Obr. 4.13 b), jejich hydraulická vodivost dosahuje velmi podobných hodnot ($7,5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s} < k < 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ pro neupravenou zeminu OMC-NE).



Obrázek 4.13 (a) Závislost hydraulické vodivosti prachovité zeminy s 1% a 3% CaO při 100% nasycení hutněných energií NE (Δ) a LE (\times) na vlhkosti (překresleno z dat Le Runigo et al., 2009) (b) vlhkosti a suchá objemové hmotnosti zeminy s 1% a 3% CaO hutněné energií HE (\blacksquare), NE a LE stanovené po 25 dnech zrání (Le Runigo et al., 2009).

Vápno přidané do zeminy vyvolalo ihned změnu distribuce pórů o poloměru pod 1 μ m. Naopak distribuce pórů o poloměru nad 1 μ m se téměř nezměnila vlivem vápna, čímž si autoři vysvětlují to, že upravené i neupravené vzorky připravené podobným způsobem dosáhly podobných hodnot hydraulické vodivosti. Hydraulická vodivost vápněných zemin klesá nejen s rostoucí vlhkostí zeminy, ale i s rostoucí hutnicí energií (Obr. 4.13 a).

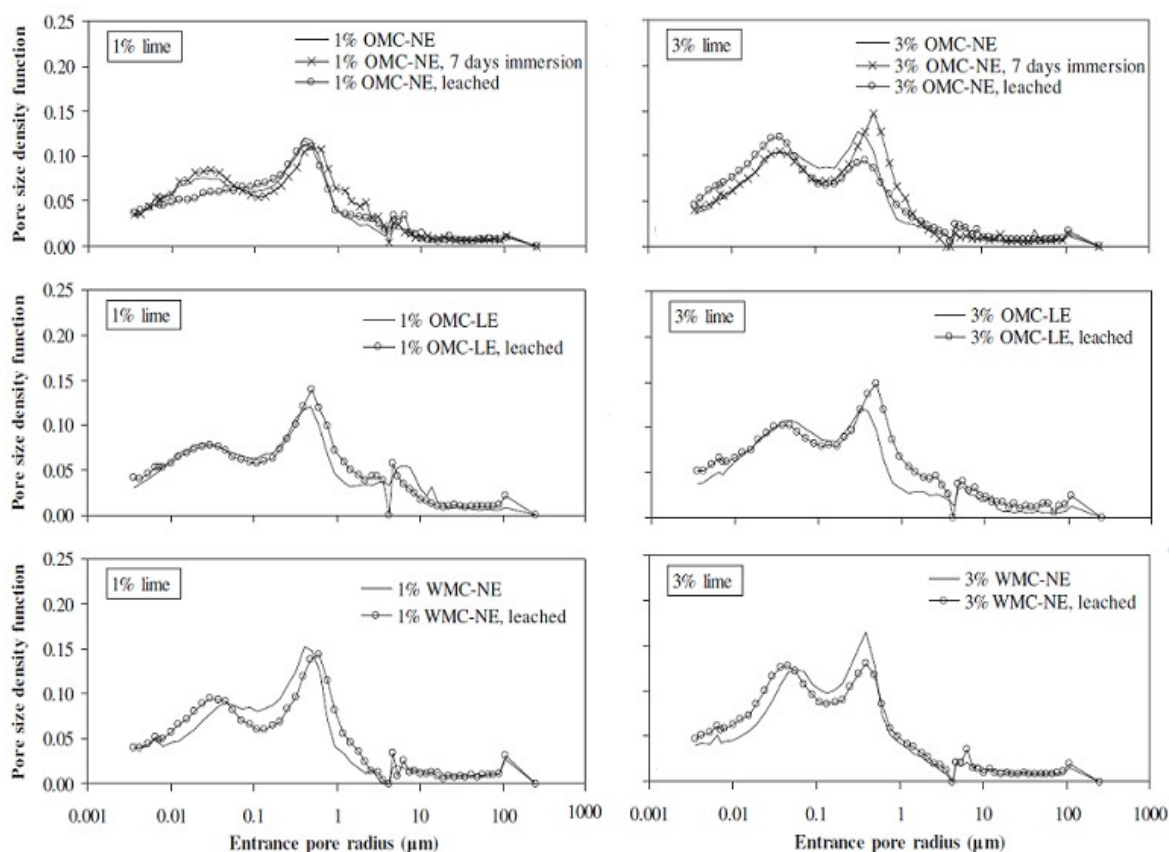
Le Runigo et al. (2009) dále podrobili nevápnné vzorky OMC-NE a vápněné vzorky OMC-LE, OMC-NE a WMC-NE po 25 dnech zrání také dlouhodobé zkoušce propustnosti po dobu 110 – 160 dnů při hydraulickém gradientu 80 a komorovém tlaku 120 kPa (Obr. 4.14).



Obrázek 4.14 Vývoj hydraulické vodivosti v průběhu 150 dnů propouštění zeminy upravené 1% a 3% CaO (Le Runigo et al., 2009).

Dlouhodobá hydraulická vodivost zeminy zůstává podle slov autorů stabilní po celou dobu propuštění, kromě směsi hutněné při OMC energií LE, kde propustnost klesá během prvních 20 dní propouštění. Tento pokles si autoři vysvětlují tím, že asi komorový tlak zmenšil póry, které nelze již detekovat MIP, ale ovlivňují vývoj hydraulické vodivosti.

U studovaných vzorků byla sledována změna distribuce pórů před a po 150 dnech propouštění (Obr. 4.15). Navíc u vzorků OMC-NE byla zjištěna distribuce pórů i po 7 dnech sycení ve vodě, kdy došlo k úplnému nasycení zkušební vzorku.



Obrázek 4.15 Vývoj mikrostruktury zeminy upravené 1% a 3% CaO před a po 7 dnech sycení (7 days immersion) a po 150 dnech propouštění (leached) (Le Runigo et al., 2009).

Změny v distribuci pórů zaznamenané po 7 dnech sycení jsou podobné změnám zaznamenané po zkoušce propustnosti. Z toho autoři vyvozují, že změny v distribuci pórů nejsou způsobeny prouděním vody, ale dochází k nim vlivem saturace vzorku.

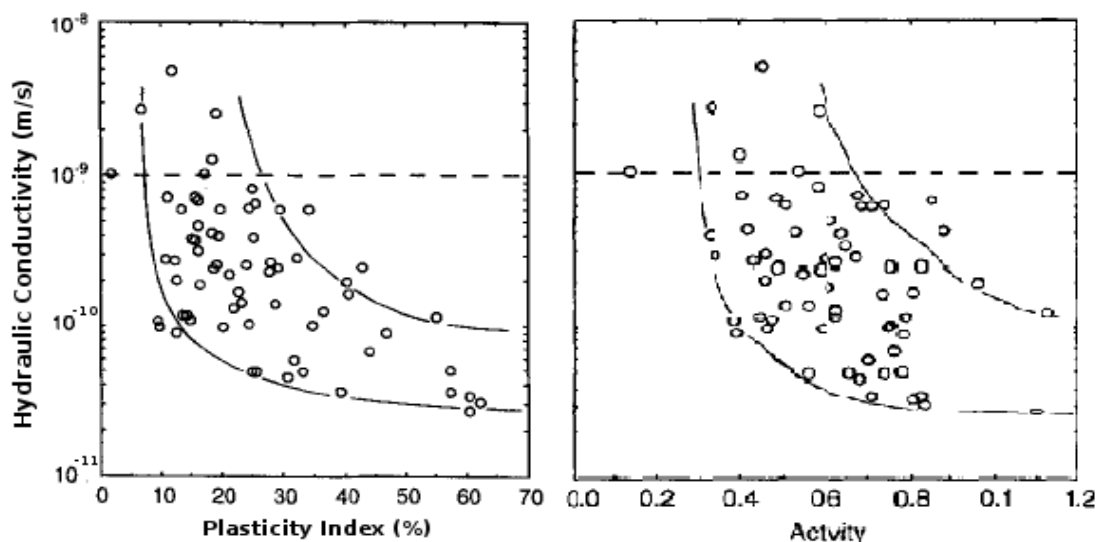
Po 150 dnech propouštění u všech vzorků došlo k nepatrnému nárůstu pórů o poloměru mezi 0,6 – 4 μm a malému poklesu pórů o poloměru mezi 0,05 – 0,6 μm . U zeminy s 1% CaO hutněné WMC-NE a u zeminy s 3% CaO hutněné OMC-LE, OMC-NE i WMC-NE vzrostlo množství pórů o poloměru pod 0,05 μm . Podle autorů voda u vápněné zeminy totiž proudí póry o poloměru větším než 1 μm , ze kterých se vyluhovávají ionty vápníku, křemíku a

hliníku. Naopak u pórů s poloměrem pod $1\ \mu\text{m}$ voda neproudí a zde probíhají pucolánové reakce, které mají za následek zmenšení pórů. Na základě stanovení množství vápenatých iontů před a po propouštění zjistili, že se obsah novotvořených minerálů u zeminy s 1% CaO nemění. U zeminy s 3% CaO bylo na základě této úvahy zjištěno, že se během propouštění vytváří další novotvořené minerály, a to více u zeminy o vlhkosti WMC hutněné energií NE než u vápněné zeminy hutněné při vlhkosti OMC stejnou energií. Tyto strukturní změny však měly nepatrný vliv na hydraulickou vodivost vápněných zemin.

4.4 Vliv množství a typu jílových částic

Lambe (1954) jako jeden z prvních ve své studii poukázal, že plasticita jílu významně ovlivňuje jejich hydraulickou vodivost. Měření hydraulické vodivosti provedl na normálně konsolidovaných jílech. Při daném čísle pórovitosti byla naměřena nejnížší hydraulická vodivost u sodného montmorilonitu, která byla vyšší u vápenatého montmorilonitu a nejpropustnější byl kaolinit. Ačkoliv Lambe (1954) ve své práci konzistenční meze jílu neprezentoval, plasticita sledovaných jílu klesá v následujícím pořadí: sodný montmorilonit > vápenatý montmorilonit > kaolinit (Mitchell, 1976).

Benson et al. (1994) vyhodnotili výsledky hydraulické vodivosti a vlastností jílu, které byly odebrány z 67 minerálních těsnění skládek (Obr. 4.16).



Obrázek 4.16 Vývoj hydraulické vodivosti zeminy s rostoucím indexem plasticity a aktivitou jílu (Benson et al., 1994).

Na tomto souboru vzorků prokázali, že hydraulickou vodivost $1 \cdot 10^{-9}\text{ m/s}$ dosahují ty zeminy, které mají $w_L \geq 20\%$, $I_p \geq 7\%$, aktivitu jílu ($I_p / \text{obsah částic} < 2\ \mu\text{m}$, Skempton, 1953) $> 0,3$, obsah jílových částic ($< 2\ \mu\text{m}$) $\geq 15\%$ a zároveň obsah jemnozrnné frakce

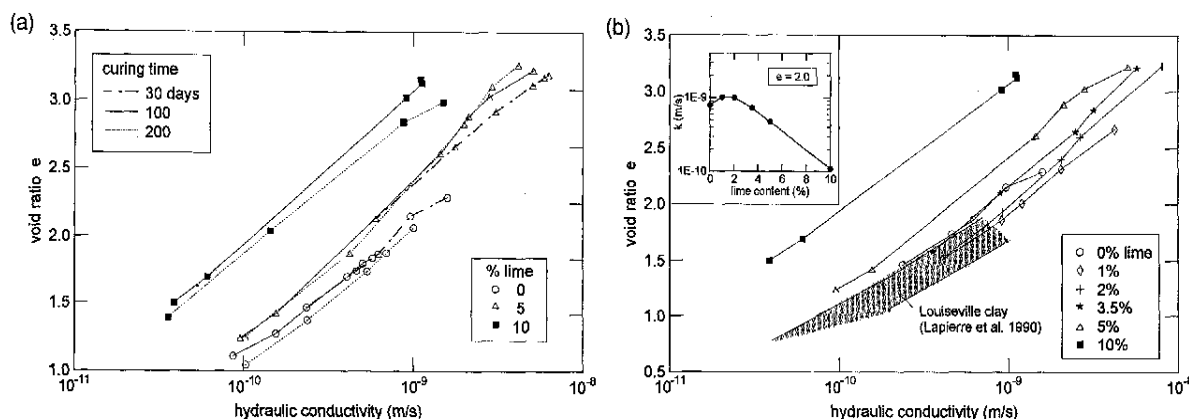
($< 0,074 \text{ mm}$) $\geq 30\%$. Hydraulická vodivost klesá s rostoucím indexem plasticity a s rostoucí aktivitou jílu (Obr. 4.16) a dále také s rostoucím množstvím jílových částic a jemnozrnné frakce v zemině.

Kenney et al. (1992) hutnili a poté propouštěli směs bentonitu s pískem při různých vlhkostech. Při $w > w_{opt}$ hydraulická vodivost směsi významně klesala při nárůstu obsahu bentonitu z 0% na 8%. Při dalším nárůstu z 8% na 12% obsahu bentonitu bylo pozorován jen nepatrný pokles hydraulické vodivosti, protože při takovém množství už jílová zrna zaplnila póry mezi pískovými zrny a kontrolovala tak propustnost zeminy.

4.5 Vliv množství vápna

Locat et al. (1996) přimíchali 0 – 10% Ca(OH)_2 do prachovitého jílu ($w_L = 67\%$, $I_p = 41\%$) o vlhkosti 122% a směs vlili do edometrického prstence. Prstenec se vzorkem byl ponořen do vodou naplněného kontejneru a přitížen 8 kPa. Po 30, 100 popřípadě 200 dnech zrání byly vzorky osazeny do edometru. Zkouška stlačitelnosti probíhala podle normového postupu, kdy každý zatěžovací stupeň trval 24 hodin. Mezi jednotlivými zatěžovacími stupni byla provedena zkouška propustnosti.

Hydraulická vodivost významně vzrostla u zeminy s obsahem 1% a 2% vápna, nepatrně vzrostla u zeminy s 3,5% vápna (Obr. 4.17 b).



Obrázek 4.17 (a) Vývoj hydraulické vodivosti v závislosti na pórovitosti zeminy s 0, 5 a 10% Ca(OH)_2 stanovená po 30, 100 a 200 dnech zrání a (b) Vliv množství vápna na vývoj hydraulické vodivosti po 30 dnech zrání (Locat et al., 1990).

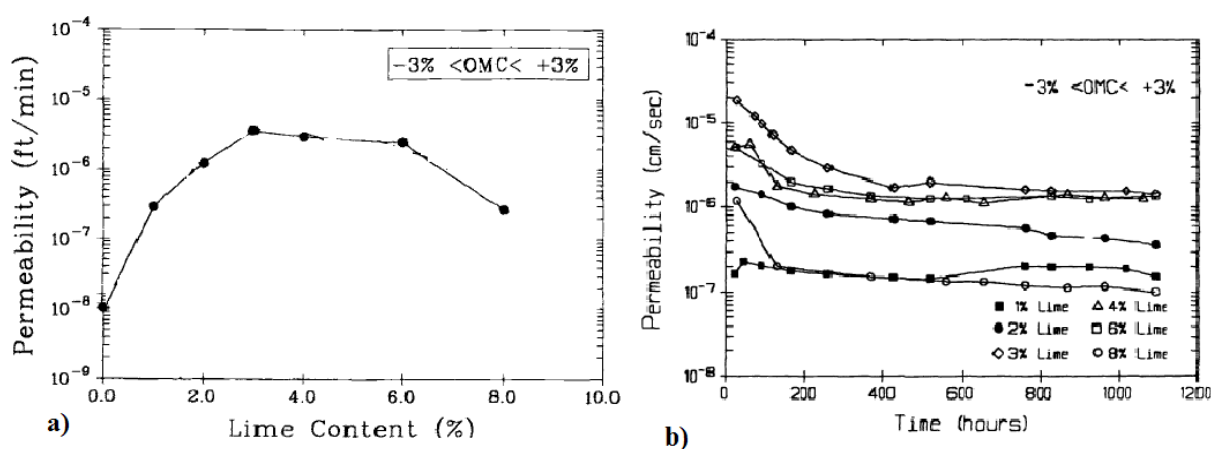
Množství vápna pod 3,5% vápna způsobuje flokulaci a nárůst množství meziagregátových (inter-aggregate) pórů. Po překročení této hranice vápna dochází k výraznému poklesu vodivosti, kde při obsahu 10% vápna se hydraulická vodivost zeminy s číslem pórovitosti 2 snižuje o řád ve srovnání s nevápněnou zeminou se stejným číslem pórovitosti. Množství

vápna 5% a 10% podporuje vznik novotvořených fází (ověřeno SEM), které zmenšují poloměr pórů (ověřeno MIP) a způsobují nižší hydraulickou vodivost zeminy. Proměnlivost hydraulické vodivosti směsi prachovité zeminy s 0%, 5% nebo 10% vápna s rostoucí dobou zrání je spíše přisuzováno variabilitě vzorků (Obr. 4.17 a).

Velmi podobnou studii provedl Quang a Chai (2015) na směsi jílu s extrémně vysokou plasticitou ($w_L = 133\%$, $I_p = 86\%$) s 0 – 16% CaO po 28 dnech zrání pod vodou. Hydraulická vodivost směsi zeminy s obsahem vápna pod 4% byla téměř srovnatelná s hydraulickou vodivostí neupravené zeminy se stejným číslem pórovitosti. Na základě výsledků MIP a SEM prokázali, že produkty pucolánových reakcí zaplňují mezičásticové (intra-aggregate) póry. Při překročení 4% CaO začnou novotvořené fáze vyplňovat i meziagregátové (inter-aggregate) póry, takže hydraulická vodivost vápněné zeminy bude nižší ve srovnání s hydraulickou vodivostí nevápněné zeminy se stejným číslem pórovitosti.

McCallister a Petry (1992) studovali vývoj hydraulické vodivosti vysoce plastického jílu (Site No. 1, $w_L = 63\%$, $I_p = 30\%$) s 1%, 2%, 3%, 4% (OMV), 6% a 8% hydratovaného vápna. U všech směsí zeminy byla stanovena optimální vlhkost a maximální suchá objemová hmotnost. Pro zkoušku propustnosti byla suchá zemina smíchána s odpovídajícím množstvím vápna a množstvím vody odpovídající optimální vlhkosti směsi ($-3\% < w_{opt}(OMC) < 3\%$). Po 24 hodinách zrání byla směs hutněna energií Proctor standard a tělesa byla po dobu 48 hodin uložena při teplotě $48,9^\circ\text{C}$. Poté byla tělesa umístěna do propustoměru s komorovým tlakem 137,9 kPa a tlakem protékající vody 68,9 kPa. Po dobu 45 dní byla destilovaná voda proteklá vzorkem sbírána do nádoby a bylo u ní stanoveno pH a obsah vyluhovaných iontů Ca^{2+} .

Hydraulická vodivost zeminy stanovená po 25 dnech propouštění výrazně roste s rostoucím množstvím vápna a při obsahu 3% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dosahuje svého maxima (Obr. 4.18 a).



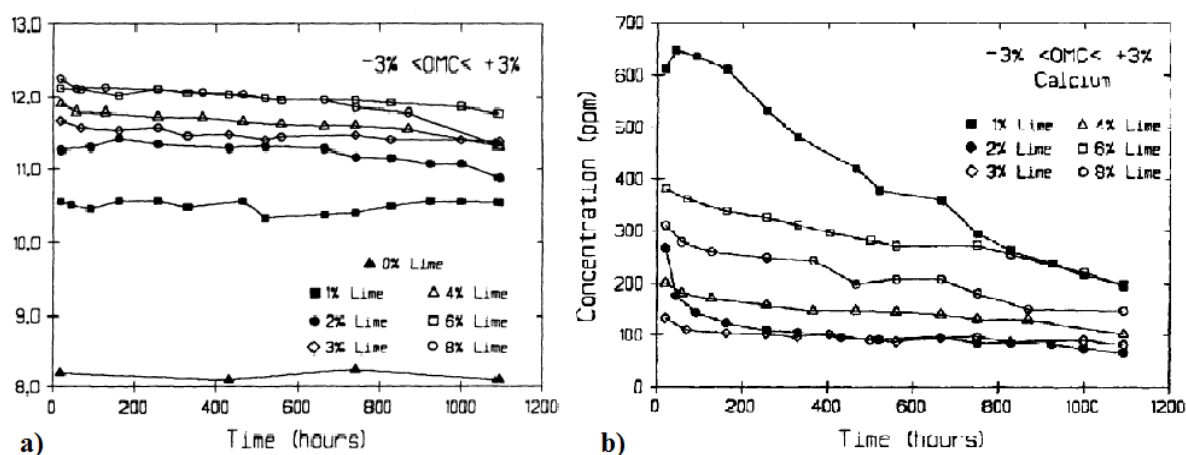
Obrázek 4.18 a) Vliv množství vápna na hydraulickou vodivost zeminy stanovenou po 600 hodinách propouštění, b) změna hydraulické vodivosti zeminy s 1 – 8% vápna během 45 dní (McCallister a Petry, 1992).

Nejmenší nárůst hydraulické vodivosti autoři zaznamenali u zeminy s 1% nebo 8% vápna. Hydraulická vodivost zpočátku rychle klesá s rostoucí dobou propouštění, avšak po 12,5 dnech (po 300 hodinách) dochází k pomalému, ale trvalému poklesu hydraulické vodivosti (Obr. 4.18 b).

Autoři předpokládají, že po 12,5 dnech propouštění se proudění ustaluje a platí Darcyho zákon pro výpočet hydraulické vodivosti.

Množství vápna pod OMV způsobí jen flokulaci jílových zrn, ale už ho není dostatek na zvýšení pH a tedy počátek pucolánových reakcí, proto hydraulická vodivost zeminy roste s rostoucím množstvím vápna od 1% do 3%. Po překročení OMV vznikají novotvořené fáze, které zabraňují proudění vody v zemině. pH výluhu roste s rostoucím množstvím vápna a mírně klesá s rostoucí dobou propouštění (Obr. 4.19 a). Je však nutno podotknout, že autoři porovnávají hydraulické vodivosti směsí s rozdílnými pórovitostmi.

I po 45 dnech propouštění si zemina s obsahem vápna nad OMV udržuje pH nad 11, což je jeden z požadavků pro udržení průběhu pucolánových reakcí (Eades a Grim, 1966, Metelková et al., 2012). Pouze výluh ze směsi zeminy s 1% vápna měl hodnotu pH pod 11 po celou dobu propouštění, takže lze předpokládat, že zde neproběhly pucolánové reakce, při



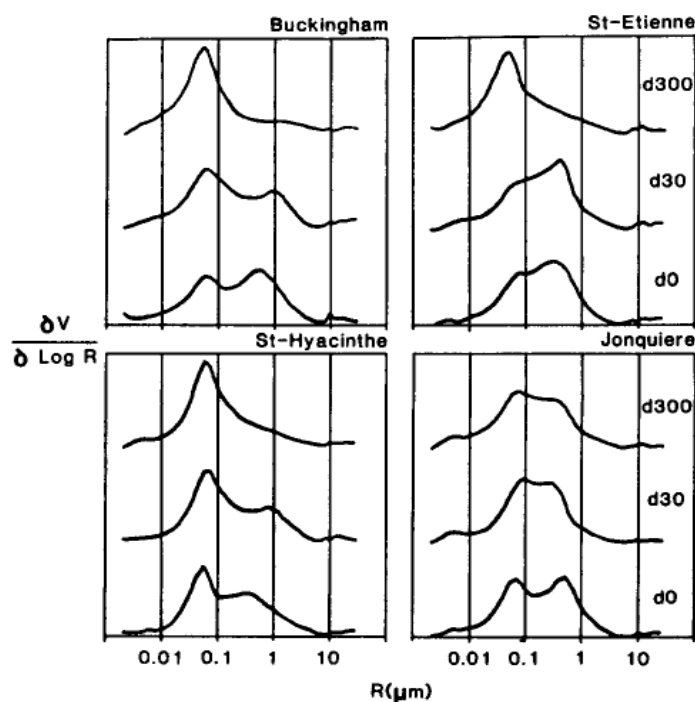
Obrázek 4.19 a) Změny pH výluhu měřený v průběhu 45 dní propouštění (McCallister a Petry, 1992), b) změny koncentrace Ca^{2+} ve výluhu měřené v průběhu 45 dní propouštění (McCallister a Petry, 1990).

kterých by se využily Ca^{2+} . Proto výluh z této směsi vykazuje nejvyšší množství Ca^{2+} .

Při propouštění se ze zeminy s 3% vápna vyluhovává nejmenší množství Ca^{2+} , avšak s dalším nárůstem množství vápna se množství Ca^{2+} ve výluhu zvyšuje (Obr. 4.19 b). Zrání vzorků s množstvím vápna nad OMV před zkouškou propustnosti nebylo dostatečně dlouhé, aby se využily ionty Ca^{2+} na pucolánové reakce a proto byly vylouženy. Množství vápenatých iontů ve výluhu klesá s rostoucí dobou propouštění.

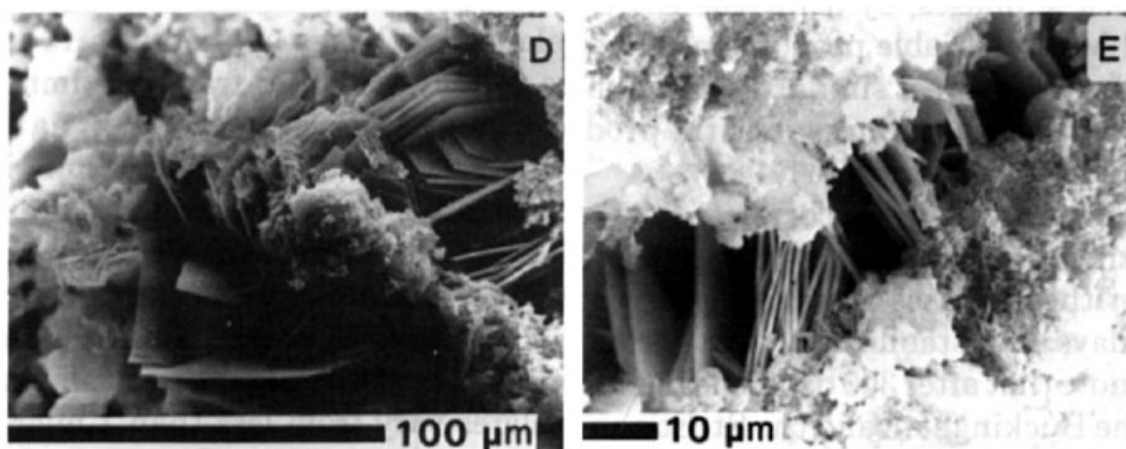
4.6 Vliv doby zrání

Choquette et al. (1987) studovali změnu distribuce pórů 4 jílu (Buckingham ($w_L = 53\%$, $I_p = 30\%$), St-Etienne ($w_L = 34\%$, $I_p = 14\%$), St-Hyacinthe ($w_L = 55\%$, $I_p = 31\%$), Jonquiere ($w_L = 42\%$, $I_p = 22\%$)) o vlhkosti blízké jejich w_L hutněné energií Proctor modifikovaný s 4% páleného vápna po 0, 30 a 300 dnech zrání při teplotě 20°C (Obr. 4.20).



Obrázek 4.20 Výsledky MIP 4 zemín s 4% CaO po 0, 30 a 300 dnech (Choquette et al., 1987).

Distribuce pórů všech směsí po 0 dnech zrání byla bimodální s největším zastoupením pórů o poloměru 0,08 μm a 0,5 – 1 μm . Vlivem rostoucí doby zrání byl pozorován pokles zastoupení pórů s poloměrem kolem 0,5 – 1 μm ve prospěch pórů o poloměru 0,08 μm .

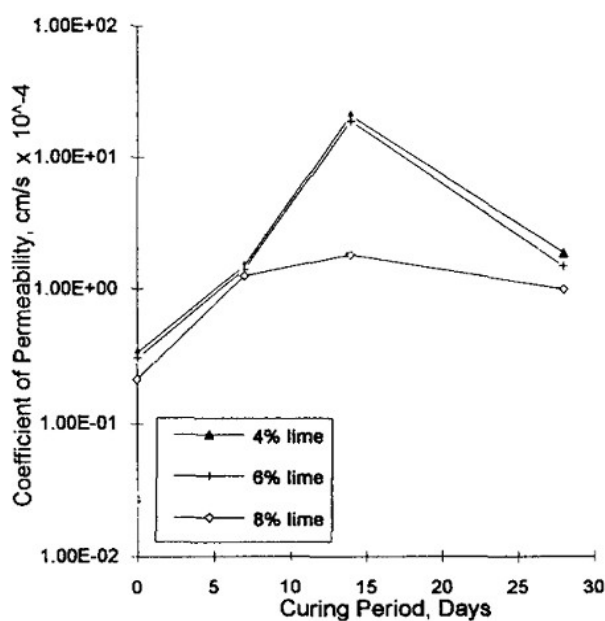


Obrázek 4.21 Snímky SEM novotvořených CASH fází u zeminy Buckingham s 4% CaO po 100 dnech zrání (Choquette et al., 1987).

Celkový objem pórů všech směsí se s dobou zrání neměnil, což autoři připisují vzniku CSH a CASH fázi destičkovitého tvaru, které pozorovali pomocí SEM a popsali pomocí rentgenové difrakce (Obr. 4.21). Novotvořené fáze jen přepaží jednotlivé póry, což vede k zmenšení jejich poloměru, ale nemá to vliv na celkový objem pórů.

Brandl (1981) zkoumal vliv hydratovaného vápna na hydraulickou vodivost zeminy s nízkou plasticitou ($w_L = 27\%$, $I_P = 5,2\%$). Vzorky byly hutněny při optimální vlhkosti daných směsí energií Proctor standard a byly uloženy až po dobu 270 dní v klimatizované místnosti. Po přidání 1% vápna do zeminy vzrostla hydraulická vodivost zeminy z $4 \cdot 10^{-8}$ cm/s na hodnotu $3 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Tento jev lze vysvětlit flokulací jílových zrn. Ale zvyšující se množství vápna nepatrně snižuje k u stejně starých vzorků, takže zemina s 5% Ca(OH)_2 dosahuje $k = 2 \cdot 10^{-7}$ cm/s. U starších vzorků byla hydraulická vodivost nižší než u vzorků zrající kratší dobu, ale se stejným obsahem vápna. Takže zemina s 7,5% Ca(OH)_2 po 180 dnech zrání dosáhla hydraulické vodivosti podobné hydraulické vodivosti neupravené zeminy. Děje se tak díky vznikajícím cementačním vazbám, které zmenšují velikost pórů.

Zkoušel se také vliv hašeného vápna a vliv doby zrání na hydraulickou vodivost lateritu ($w_L = 44\%$, $I_P = 20\%$) s převahou kaolinitu (Osinubi, 1998). Suchá zemina byla smísena s 4% (LMO), 6% nebo 8% Ca(OH)_2 a byla navlhčena na optimální vlhkost směsi, tj. 17,9%, 19%, respektive 20,5%. Poté byla směs zhutněna do válce energií Proctor standard na suchou objemovou hmotnost 1760 kg/m^3 , 1755 kg/m^3 , respektive 1742 kg/m^3 . Po 0, 7, 14 a 28 dnech zrání byla stanovna hydraulická vodivost směsí (Obr. 4.22).

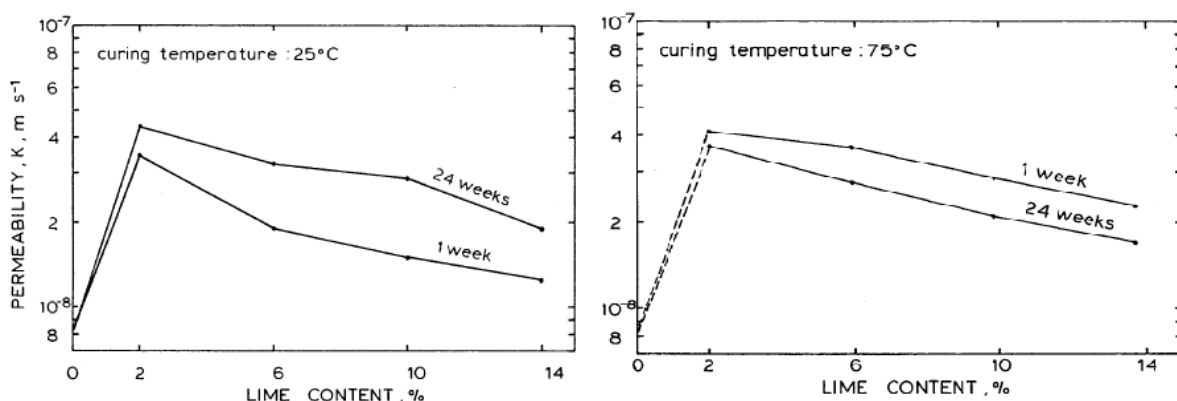


Obrázek 4.22 Vývoj hydraulické vodivosti zeminy s 4%, 6% a 8% vápna s dobou zrání (upraveno, Osinubi, 1998).

Po 0 dnech zrání hydraulická vodivost směsi mírně klesá s rostoucím množstvím vápna, i když klesá suchá objemová hmotnost zeminy. Dále hydraulická vodivost roste s rostoucí dobou zrání a po 14 dnech zrání dosahuje svého maxima a poté klesá. Autoři předpokládají, že pokles hydraulické vodivosti je pravděpodobně způsobena tvorbou novotvořených fází nebo vysrážením uhličitanu vápenatého v pórech.

Wild et al. (1987) upravili jíl se střední plasticitou ($w_L = 37\%$, $I_p = 18\%$) s 2%, 6%, 10% nebo 14% Ca(OH)_2 a každá směs byla hutněna na stejnou suchou objemovou hmotnost. Všechna zhutněná tělesa zrála při teplotě 25°C, 50°C nebo 75°C po dobu jednoho nebo 24 týdnů. Poté byly vzorky syceny po dobu 48 hodin v destilované vodě, aby se zajistila jejich úplná saturace a poté byla měřena hydraulická vodivost. Na vzorcích po uplynutí doby zrání byla stanovena distribuce pórů pomocí MIP, ale vzorky pro tuto analýzu byly sušeny při teplotě 20°C po dobu 3 měsíců a poté 1 den sušeny při 100°C, což není zcela vhodné pro MIP, protože mohlo dojít k smrštění a deformaci pórového prostoru zeminy.

Hydraulická vodivost směsi s obsahem do 2% Ca(OH)_2 roste s rostoucím množstvím vápna způsobené pouze flokulací zrn. Naopak hydraulická vodivost směsi s obsahem nad 2% Ca(OH)_2 klesá s rostoucím množstvím vápna vlivem vzniku novotvořených fází (Obr. 4.23).



Obrázek 4.23 Závislost hydraulické vodivosti vápnem upravené zeminy na množství vápna zrající při teplotě 25°C a 75°C po dobu 1 a 24 týdnů (Wild et al., 1987).

Novotvořené fáze vyplňují póry o poloměru větším než 4 μm a narůstá počet pórů o poloměru 0,004 - 0,04 μm , které však nemají zásadní vliv na hodnotu hydraulické vodivosti směsi. U směsi zrající při teplotě 25°C se tvoří málo novotvořených fází a propustnost roste s rostoucí dobou zrání. Avšak při vyšší teplotě zrání je tvorba novotvořených fází značná a vede ke snížení hydraulické vodivosti s rostoucí dobou zrání.

4.7 Shrnutí

V kapitole 4 byly shrnuty poznatky z odborné literatury o změně pórového prostoru jílovité zeminy vlivem přidání vápna a její dopad na hydraulickou vodivost vápněných zemin.

Ihned po přidání vápna do prachovité zeminy se snižuje suchá objemová hmotnost zeminy a roste pórovitost n_{MP} , a to nejvýznamněji u zemin s vlhkostí optimální nebo vyšší, což Russo et al. (2007) připisují výraznému nárůstu objemu hrubých pórů a mírnému nárůstu objemu makropórů, jejichž objem během 28 dní zrání klesá (Obr. 4.4). Naopak Le Runigo et al. (2009), respektive Cusinier et al. (2011), připisují pokles suché objemové hmotnosti významnému nárůstu počtu pórů o poloměru $0,01 - 0,2 \mu\text{m}$ (mezopóry až makropóry), respektive o poloměru pod $0,15 \mu\text{m}$, jejichž objem se nemění s rostoucím množstvím vápna, ani je neovlivňuje rostoucí hutnicí energie, ani změna způsobu hutnění. Avšak jejich objem roste s rostoucí vlhkostí směsi.

I když vlivem vápna dochází k významnému snížení suché objemové hmotnosti zeminy a ke změně distribuce pórů o poloměru pod $1 \mu\text{m}$ (Le Runigo et al., 2009), respektive pod $1,5 \mu\text{m}$ (Cusinier et al., 2011), nemusí se to významně odrazit na změně hydraulické vodivosti vápněné zeminy. Podle Le Runigo et al. (2009) přispívají k nárůstu hydraulické vodivosti vápněné zeminy póry o poloměru nad $1 \mu\text{m}$ a podle Cusinier et al. (2011) póry o poloměru nad $1,5 \mu\text{m}$. Tyto póry se objevily u vápněných zemin, které byly hutněny při vlhkosti nižší než je optimální vlhkost směsi nebo byly hutněny energií nižší než je energie Proctor standard. Proto byly propustnější než vápněné zeminy, které byly hutněny při vlhkosti vyšší než je optimální vlhkost směsi, byly hutněny energií vyšší než je energie Proctor standard nebo byly hutněny ježkovým válcem. U takto upravených vápněných zemin nepozorovali Le Runigo et al. (2009) póry o poloměru nad $1 \mu\text{m}$, respektive Cusinier et al. (2011) póry o poloměru nad $1,5 \mu\text{m}$.

S rostoucí dobou zrání Choquette et al. (1987) u jílu s 4% vápna, ale i Le Runigo et al. (2009) u zeminy s 3% CaO zaznamenali pokles objemu makropórů a nárůst objemu mezopórů až makropórů o poloměru pod $0,1 \mu\text{m}$, což přisuzují tvorbě portlanditu a dalších novotvořených fází. Tyto změny pórového prostoru se však neodrazilo na snížení hydraulické vodivosti (Le Runigo et al., 2009). Naopak Locat et al. (1996) na směsi prachovitého jílu s $0 - 10\% \text{Ca(OH)}_2$ i Quang a Chai (2015) na směsi jílu s extrémně vysokou plasticitou s $0 - 16\% \text{Ca(OH)}_2$ prokázali, že po překročení hranice 4% vápna začnou produkty pucolánových reakcí zaplňovat nejen mezičásticové (velikostí odpovídají mezopórům až makropórům), ale i meziagregátové póry (velikostí odpovídají hrubým pórům), takže vápněná

zemina dosáhla nižší hydraulické vodivosti ve srovnání s hydraulickou vodivostí nevápněné zeminy o stejném čísle pórovitosti. Brandl (1981), Wild et al. (1987) nebo Osinubi (1998) na základě svých měření předpokládají pokles hydraulické vodivosti vápněné zeminy i s rostoucí dobou zrání.

Dlouhodobé propouštění (až 150 dnů) nemá významný dopad na změnu hydraulické vodivosti (McCallister a Petry, 1992; Le Runigo et al., 2009). Pouze u směsi zeminy s 3% CaO se během propouštění v pórech o poloměru pod 1 μm , kterými neproudila voda, vytvořily další novotvořené fáze (Le Runigo et al., 2009).

Ve výše uvedených pracích studovali citovaní autoři zeminu s přídavkem vápna, jehož množství bylo velmi blízko hodnotě optimálního množství vápna, a dále jejich doba zrání nepřesáhla 1 měsíc. Výjimkou je například studie Locat et al. (1996), kteří pozorovali snížení hodnoty hydraulické vodivosti na směsi zeminy až s 10% Ca(OH)_2 po 200 dnech zrání, avšak směs byla extrémně zvlhčena a její příprava neodpovídala požadavkům stavby. To znamená, že zemina s přídavkem vápna nebyla hutněna energií Proctor standard při vlhkosti blízké optimální vlhkosti směsi.

5. Vlastnosti použitého materiálu

5.1 Zemina

Pro experimentální výzkum byla použita zemina ze zemníku (Obr. 5.1) ležícího na západním okraji obce Horky nad Jizerou. Zemník čtvrtohorního stáří tvoří spraše a sprašové hlíny o mocnosti 7 – 10 m, které leží na podloží křídových opuk.



Obrázek 5.1 Zemník spraše u obce Horky nad Jizerou, červená šipka vyznačuje místo odběru.

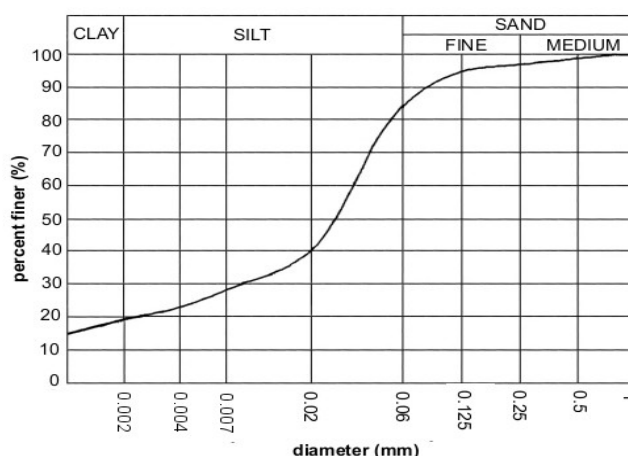
Zemina má hnědou až světle okrově hnědou barvu a je velmi dobře zrněná s nejvíce zastoupenou prachovitou složkou, která směrem k bázi klesá na úkor jílové frakce (Obr. 5.2). Uhličitán vápenatý se v nich vyskytuje ve formě výkvětů a drobných cicvárů spolu se železitými záteky. Zemina byla odebrána z nejvýše položené etáže zemníku cca 1,5 m pod povrchem. Před zahájením laboratorních zkoušek jsem zeminu vysušila na vzduchu, rozdružila a prosála sítem o velikosti oka 2 mm, při kterém jsem odstranila cca 0,4 hm. % organické hmoty a úlomků cicvárů.



Obrázek 5.2 Spráš ze zemníku Horky nad Jizerou při přirozené vlhkosti.

5.1.1 Zrnitost zeminy a konzistenční meze

Stanovení zrnitosti studované zeminy a její konzistenční meze byly provedeny v laboratoři geomechaniky Arcadis CZ a.s. Stanovení zrnitosti zeminy bylo provedeno dle ČSN CEN ISO/TS 17892 – 4 (2005) a konzistenční meze zeminy byly stanoveny podle ČSN CEN ISO/TS 17892 – 12 (2005). Spráš je velmi dobře zrněná s převahou prachovitých částic (Obr. 5.3). Dále obsahuje 15% písčitých částic. Obsah jílové frakce byla stanovena na 20 hm. %.



Obrázek 5.3 Zrnitostní křivka spráše ze zemníku Horky nad Jizerou, použité pro experimentální výzkum.

Vlhkost na mezi plasticity byla stanovena na 18% a vlhkost na mezi tekutosti na 35%. Na základě Casagrandeho plasticitního diagramu je zemina klasifikována jako jíl s nízkou plasticitou (CL) a podle normy ČSN EN ISO 14688 – 2 (2005) lze spráš klasifikovat jako jílovitý silt.

5.1.2 Chemické a mineralogické složení studované zeminy

Základní silikátová analýza byla provedena na třech vzorcích v laboratoři analytické chemie společnosti Gematest s.r.o. (Tab. 5.1). Před vlastní analýzou byly vzorky vysušeny na vzduchu a pomlety na analytickou jemnost.

Tabulka 5.1 Výsledky základní silikátové analýzy.

Označení dle UK		SP I	SP II	SP III	
Označení dle Gematestu		32933	32934	32935	průměr
Suš.	% hm.	2,55	3,12	3,44	
H ₂ O ⁺	% hm. suš.	5,40	5,86	6,34	5,87
SiO ₂	% hm. suš.	56,99	56,18	53,92	55,70
Al ₂ O ₃	% hm. suš.	12,05	12,14	12,72	12,30
Fe ₂ O ₃	% hm. suš.	3,89	3,36	3,23	3,49
FeO	% hm. suš.	0,32	0,57	0,83	0,57
TiO ₂	% hm. suš.	0,79	0,57	0,83	0,76
CaO	% hm. suš.	10,07	9,96	10,52	10,18
MgO	% hm. suš.	0,88	0,86	0,88	0,87
Na ₂ O	% hm. suš.	0,59	0,48	0,40	0,49
K ₂ O	% hm. suš.	2,28	2,10	2,18	2,19
P ₂ O ₅	% hm. suš.	0,14	0,24	0,28	0,22
MnO	% hm. suš.	0,04	0,03	0,03	0,03
CO ₂	% hm. suš.	6,38	6,70	7,10	6,73

Mineralogické složení výše uvedených tří vzorků bylo stanoveno pomocí práškové RTG difrakční analýzy v laboratoři RTG difraktometrie VŠCHT v Praze (analyzoval RNDr. Jaroslav Maixner, CSc.). Měření proběhlo na difraktometru X'Pert Pro (PANalytical) s X'Cellerator detektorem v rozsahu 4-60° 2theta, s krokem 0,02° za 21,3 s a při napětí 40 kV a 30 mA. Výsledky měření jsou uvedeny v příloze.

Výsledky silikátové analýzy a RTG difrakčního rozboru byly využity k výpočtu kvantitativního zastoupení hlavních minerálních fází (> 1 hm. %) za pomoci programu CQPA (Klika a Weiss, 1993) s přesností 0,5 hm. % (výpočet provedl RNDr. Radek Hanus PhD.). Akcesorické fáze (< 1 hm. %) nebyly do výpočtu zahrnuty. Z výsledků je zřejmé, že ve studované spraši převládá křemen, illit a kalcit, minoritně doprovázené K-živcem, montmorillonitem a kaolinitem (Tab. 5.2).

Tabulka 5.2 Procentuální zastoupení minerálů ve zkoumané zemině.

zastoupené minerály	hm. %
křemen	39 - 44
illit	30 - 31
kalcit	17 - 19
montmorilonit	4 - 9
ortoklas	2 - 4
kaolinit	2 - 4

5.2 Vápno

Pro laboratorní experimenty bylo použito vápno z vápenky Čertovy schody. Podle výrobce (Lhoist) vápno obsahuje 94,6% CaO (celkem) a 90,3% aktivního CaO. Bylo dodáno v jemně mleté formě, které obsahovalo méně než 0,5% částic větší než 200 μm .

6. Použité měřící metody

Pro sledování změny pórového prostoru studované zeminy nejen s rostoucím množstvím vápna (1 – 8% CaO) a s rostoucí dobou zrání (1 – 540 dní), ale i pro sledování změny pórového prostoru vápněné zeminy v důsledku dlouhodobého propouštění vápněné zeminy jsem zvolila rtuťovou porozimetrii, která je v literatuře (např. Le Runigo et al., 2009; Cusinier et al., 2011) hojně využívanou metodou. Hydraulickou vodivost vápněných zemin jsem stanovila po různé době zrání zkouškami propustnosti. Pro stanovení obsahu vápenatých iontů ve vzorcích vody, které jsem odebírala v průběhu zkoušky propustnosti, jsem zvolila emisní spektrometr s indukčně vázaným plazmatem. Pro stanovení fázového složení zeminy s přídavkem vápna jsem zvolila práškovou RTG difrakci.

6.1 Rtuťová porozimetrie (MIP)

Tato metoda je založena na jevu kapilární deprese, kdy rtuť pro vysokou hodnotu povrchového napětí se chová k minerálním zrnům jako nesmáčivá kapalina, a proto může vniknout do soustavy pórů pouze účinkem vnějšího tlaku. MIP vychází z velmi zjednodušených modelových představ přímých válcových pórů s kruhovým průřezem, které se vzájemně neprotínají a liší se pouze poloměrem. Pro klasifikaci velikosti pórů jsem použila modelový systém IUPAC vycházející z odlišnosti průběhu fyzikální adsorpce plynů.

6.1.1 Popis přístroje a průběh MIP

Distribuce pórů ve studovaných vzorcích byla stanovena na přístroji AutoPore IV 9500 Micromeritics na Ústavu anorganické technologie VŠCHT v Praze (měřila Ing. Ivona Sedlářová, Ph.D). Zvolené zařízení umožňuje měřit póry o průměru 0,003 – 360 μm . Jeho jádrem je dilatometr (penetrometr) o známé hmotnosti W_d , do kterého se vloží suchý vzorek zkoumané pórovité látky o velikosti kolem prvních desítek milimetrů krychlových, což odpovídá hmotnosti vzorku M_s cca 1 g. Plyny a páry přítomné ve vzorku se vyevakují při tlaku 20 mm Hg (0,1 kPa). Dilatometr se vzorkem se umístí do autoklávu, který je zcela

zaplněn olejem nebo alkoholem. V autoklávu se postupně zvyšuje tlak, což způsobuje pronikání rtuti do dilatometru. Po úplném zaplnění dilatometru rtutí se opět dilatometr zváží (W_{dsm}). Ze znalosti objemu rtuti v dilatometru V_m a objemu dilatometru V_d lze vypočítat celkový objem vzorku zeminy V_b dle (6.1).

$$V_b = V_d - V_m = V_d - \frac{(W_{dsm} - M_s - W_d)}{\rho_{Hg}} \quad (6.1),$$

kde $\rho_{Hg} \sim 13,54$ g/ml je hustota rtuti.

Při postupném nárůstu tlaku je objem všech pórů postupně zaplňován vtlačovanou rtutí, přičemž při nízkých tlacích (0,01 – 0,2 MPa) jsou postupně zaplňovány hrubé póry a část makropórů a při vyšších tlacích (0,2 – 400 MPa) jsou zaplňovány zbývající makropóry a mezopóry (Tab. 4.2). Detailní popis přístroje a jeho využití uvádí např. Drake (1945). Objem rtuti vtlačené do pórů při určitém tlaku se určuje z poklesu menisku rtuti v kalibrované kapiláře dilatometru. Celkový objem rtuti V_{tot} vtlačené do vzorku pomocí narůstajícího tlaku z P_i na P_{i+1} je pak roven objemu pórů V_p o poloměru v rozsahu od r_i do r_{i+1} . Kvantitativně lze vztah mezi poloměrem póru a tlakem vyjádřit pomocí Washburnova (1921) vzorce (6.2), který uvažuje válcový tvar póru s kruhovým průřezem.

$$P = \frac{-2\gamma \cdot \cos(\theta)}{r} \quad (6.2),$$

kde P (N/m²) je tlak, pomocí něhož rtuť vniká do pórů o poloměru r (m), a θ je úhel smáčení rtuti. Povrchové napětí γ je závislé na teplotě a může nabývat hodnot od 474 do 485 mN/m, ale nemá významný vliv na vypočítaný poloměr póru (Penumandu a Dean, 2000). Do výpočtové rovnice (6.2) byla dosazena hodnota povrchového napětí 485 mN/m.

Úhel smáčení θ může nabývat hodnot od 110° do 180° v závislosti na zkoumaném materiálu. Diamond (1970) stanovil úhel smáčení pro kaolinit a illit 147° a pro montmorilonit 139°, avšak pro směsné zeminy se běžně používá úhel smáčení 130°, který byl také zvolen i pro studovanou vápněnou zeminu. Ze znalosti V_{tot} a V_b software Autopore IV Micromeritics automaticky vypočte pórovitost n_{MIP} (6.3)

$$n_{MIP} = \frac{V_{tot}}{V_b} \cdot 100 \quad (6.3).$$

Pórovitost vypočtená z výsledků MIP (n_{MIP} , rovnice 6.3) je objem pórů dostupných pro rtuť při maximálním tlaku měření v objemové jednotce zeminy a liší se od pórovitosti, která podle mechaniky zemin vyjadřuje objem všech pórů v objemové jednotce zeminy (n , rovnice 4.2).

6.1.2 Data získaná z MIP

Výstupem měření pomocí MIP je intruzní křivka, která udává experimentálně zjištěnou závislost kumulativního objemu rtuti vtlačené do objemu vzorku V na tlaku P . Software Autopore IV Micromeritics automaticky vytvoří z experimentálně zjištěných údajů následující grafické výstupy:

a) kumulativní distribuci pórů (integrální distribuce) $V=f(r)$

Závislost kumulativního intruzního objemu na poloměru pórů, kde bod inflexe zaznamenává největší distribuci pórů.

b) distribuční křivku $dV=f(\log r)$

Závislost přírůstku intruzního objemu na logaritmu poloměru pórů.

c) frekvenční křivku $dV/d\log r = f(\log r)$

Ukazuje, které póry přispívají k celkovému objemu pórů nejvíce. Křivka může mít jedno maximum tj. tzv. monodisperzní pórová struktura nebo velmi často má dvě maxima tzv. bidisperzní pórová struktura, která obsahuje póry dvou odlišných velikostí.

6.1.3 Sušení vzorku

Před měřením pomocí MIP musela být odstraněna voda z pórů zeminy, avšak metoda sušení vzorků nesměla změnit či poškodit strukturu zeminy. Jako nejvhodnější metodu sušení jsem vybrala lyofilizaci se sublimací, protože je velmi často používána při sušení prachovité zeminy upravené vápnem (Russo et al. 2007, Le Runigo et al., 2009, Cusinier et al., 2011) a jedná se o sušící metodu, která nejméně porušuje vzorek (např. Gillott, 1973). Sušení zeminy proběhlo na fakultě agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů ČZU Praha v lyofilizátoru Cryodos – 80 od firmy Telstar (provedl Ing. Vladimíra Plachého, Ph.D). Do jednotlivých zkumavek jsem vložila hrudky zkoumané zeminy o velikosti do 1 cm. Poté byl vlhký vzorek pomocí tekutého dusíku zmrazen a vzniklý led pod vakuem vysublimován. Po sublimaci měl vzorek reziduální vlhkost okolo 7 - 8%, proto následovalo sekundární sušení pomocí desorpce.

6.1.4 Nespolehlivosti MIP

Zdroje chyb při MIP uvedl Diamond (1970), z nichž některé jsem uvedla v následujícím textu.

Pomocí MIP nelze naměřit všechny velikosti a typy pórů, které jsou zastoupeny v materiálu, ale pouze ty, které odpovídají rozsahu použitého tlaku vtlačené rtuť. Póry jsou měřitelné jen v daném rozsahu tlaků. Otevřené póry mohou být dostupné prostřednictvím vstupní cesty o menším poloměru než má pór sám. Objemům těchto pórů jsou chybně přiřazeny poloměry této vstupní cesty. Uzavřené póry jsou nepřístupné pro rtuť, a tedy touto metodou neměřitelné. Opakovatelnost křivky distribuce pórů je závislá na homogenitě studovaného materiálu (Diamond, 1970), proto jsem kladla velký důraz na přípravu studovaných vzorků (kapitola 7). Distribuce velikosti pórů získaná MIP nemůže odrážet skutečnou distribuci pórů ve vzorku kvůli nespolehlivému určení úhlu smáčení rtuť a chybné představě válcových pórů (Lawrence, 1978), ale lze alespoň porovnávat trendy ve změnách frekvenčních křivek zeminy upravené vápnem vlivem stárání (kapitola 9).

6.2 Stanovení OMV

Optimální množství vápna jsem stanovila měřením pH. Ke stanovení jsem použila na vzduchu vysušenou zeminu, kterou jsem rozpojila v třecí misce a prosála sítím o velikosti oka 0,4 mm. Roztoky jsem připravila podle BS 1924 – 2 (1990). 20 g suché zeminy jsem smísila s 0,5%; 1%; 1,5%; 2%; 2,5%; 3%; 4%; 5%; 6% a 8% CaO a 100 ml destilované vody. Tyto směsi jsem důkladně promísila v třepačce po dobu 15 minut. Po hodině jsem pomocí pH metru SCOTT s elektrodou BlueLine 28pH stanovila pH všech směsí. Dále jsem pH měřila po 4, 14, 28, 56, 120, 180, 240, 360 a 540 dnech zrání při teplotě 22 – 25°C.

Sotorník (2011) v rámci své bakalářské práce, která byla vypsána v souvislosti s mým výzkumem, sledoval vývoj konzistenčních mezí sprašové zeminy s rostoucím množstvím vápna a s rostoucí dobou zrání. Zkoumanou zeminu rozdělil na 2 části. Jednu část navlhčil destilovanou vodou na vlhkost blízké hodnotě meze tekutosti a druhou na vlhkost kolem meze plasticity. Po 24 hodinách uložení pasty v klimatizované místnosti při teplotě 21°C a 100% vzdušné vlhkosti ručně přimíchal 0,5%; 1%; 2%; 2,5% a 3% CaO. Po 1, 2, 4, 8, 24, 48 a 72 hodinách zrání stanovil konzistenční meze směsí podle ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (2005). Vlhkost na mezi tekutosti měřil za pomoci automatického kuželového přístroje infraTest Prüftechnik s kuželem 80g/30°. Výsledky Sotorníka (2011) jsem využila pro stanovení OMV sprašové zeminy.

6.3 Hydraulická vodivost

Hydraulickou vodivost k jsem měřila v laboratoři mechaniky zemin UK a v laboratoři geomechaniky Arcadis CZ pomocí trojosé komory, která byla napojena na zdoje tlaku GDS,

u kterých je možno nastavit sytící tlak do 3 MPa. Měřidla GDS kontrolovala komorový tlak, tlak na dolní a horní drenáži. Zkoušky propustnosti probíhaly na vzorcích 90 – 150 dní při sytícím tlaku 300 kPa a hydraulickém gradientu 30 a efektivním napětí okolo 10 kPa. V laboratoři jsem stanovila na základě normy ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (2005) a výslednou hodnotu k jsem přivedla na referenční teplotu 10°C.

Po dlouhodobé zkoušce propustnosti vápněných i nevápněných vzorků jsem si ověřila propustnost měřicího aparátu. Tuto hodnotu jsem pak porovnála s propustností aparátu, jež jsem stanovila před zkouškou propustnosti zkušebních vzorků. Nepodařilo se prokázat, že by se měřicí aparát zanášel.

6.4 Rentgenová difrakce

Fázové složení upravené zeminy s 8% CaO po 1, 7, 14, 28, 56 a 120 dnech zrání bylo stanoveno v laboratoři rentgenové difrakce Ústavu geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů na Univerzitě Karlově v Praze. Mgr. Viktor Goliáš Ph.D. měření provedl na X'Pert Pro (PANalytical) difraktometru s X'Cellerator detektorem v rozsahu 3-60° 2theta, s krokem 0,05° za 2,5 s a při napětí 40 kV a 30 mA. Získaná data vyhodnotil Prof. Richard Přikryl, Dr. v počítačovém programu X'Pert HighScore.

6.5 Stanovení vápenatých iontů ve výluhu

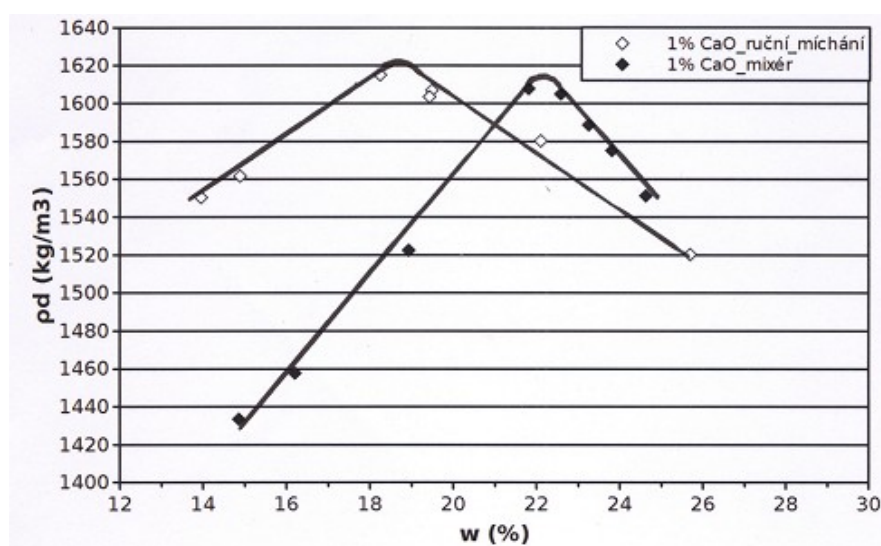
Během zkoušky propustnosti vápněné zeminy jsem ve zvolených časových intervalech odebírala vzorky vody, které protekly vzorkem zeminy. Obsah vápenatých iontů v odebraných vzorcích vody byl stanoven pomocí emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (stanovila Ing. Věra Vonásková, Laboratoře geologických ústavů, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze).

7. Příprava zkušebních vzorků

Před studiem vývoje pórového prostoru s dobou zrání a s různým množstvím vápna bylo nutno zvolit takový způsob přípravy zkušebních vzorků, aby byla zajištěna homogenita pórového prostoru. Nejprve jsem připravila zkušební vzorek zhutněním podle ČSN EN 13286-2 (2005), u kterého byla pomocí MIP zkoumána homogenita pórového prostoru v rámci celé výšky vzorku (kapitola 7.1). Na základě těchto výsledků jsem obměnila přípravu zkušebních vzorků a její vhodnost byla opět ověřena měřením pórového prostoru za pomoci MIP (kapitola 7.2).

7.1 Příprava zkušebních vzorků dle ČSN EN 13286-2

Na směsi zeminy s 1% CaO jsem stanovila závislost vlhkosti na suché objemové hmotnosti (Obr. 7.1). Vzorky směsi byly připraveny 2 různými způsoby (kapitola 7.1 a 7.2).

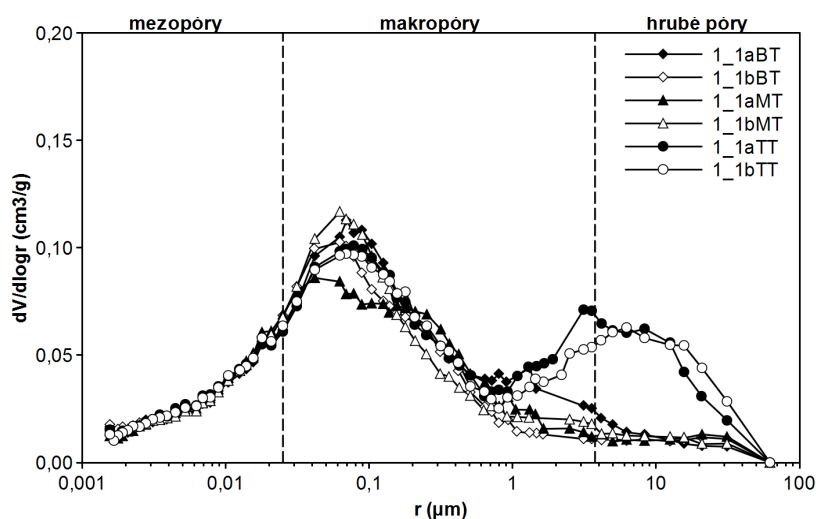


Obrázek 7.1 Suchá objemová hmotnost – vlhkost zeminy s 1% vápna mísené ručně a hutněné energií PS ve třech vrstvách nebo mísené mixérem a hutněné energií PS v jedné vrstvě.

Nejprve jsem připravila 7 dávek, z nichž každá obsahovala 2500 g na vzduchu vysušené zeminy. Zeminu jsem smísila s příslušným množstvím pitné vody tak, aby bylo dosaženo

takového rozmezí vlhkostí, které by umožnilo stanovit optimální vlhkost směsi. Po 24 hodinách jsem navlhčenou zeminu ručně mísila s 1% CaO (vypočteno ze sušiny zeminy). Po 2 hodinách zrání v laboratorních podmínkách (22 – 25°C) jsem celou směs hutnila energií Proctor standard (PS, ČSN EN 13286-2, 2005) ve třech vrstvách. Závislost ρ_d na w těchto těles s 1% CaO je znázorněna na obrázku 7.1.

Vzorek o vlhkosti 19,5% a suché objemové vlhkosti 1606,7 kg/m³ (výška 120 mm, průměr 100 mm) jsem zabalila do igelitového sáčku a uložila po dobu 1 dne do exikátoru s vodou při teplotě 22 – 25°C. Poté jsem z horní (TT), střední (MT) a dolní (BT) třetiny odebrala 2 vzorky (a, b), které byly sušeny v lyofilizátoru po dobu jednoho dne. Zastoupení pórů v jednotlivých vzorcích bylo stanoveno pomocí MIP (Obr. 7.2), jež bylo vyhodnoceno jako nehomogenní.



Obrázek 7.2 Distribuce pórů 2 vzorků (a, b) odebraných z dolní (BT), střední (MT) a horní (TT) třetiny vzorku.

Vzorky z TT vykazují bidisperzní pórový prostor a dosahují o cca 5 – 6% vyšší pórovitosti (Tab. 7.1), než je tomu u vzorků z MT a BT.

Tabulka 7.1 Pórovitost n_{MIP} vzorků a,b odebraných z horní (TT), střední (MT) a spodní (BT) třetiny zeminy s 1% CaO po 1 dni zrání.

	1_1aBT	1_1bBT	1_1aMT	1_1bMT	1_1aTT	1_1bTT
n_{MIP} (%)	31,80	28,99	29,85	30,04	36,29	36,55

Ručně smíšená zemina s vápnem je tvořena různě velkými hrudkami. Hrudky v dolní a střední třetině vzorku jsou pravděpodobně rozduženy energií PS, kterou jsou hutněny vrstvy nad nimi. Proto BT a MT mají monodisperzní pórový prostor. U horní třetiny energie PS není

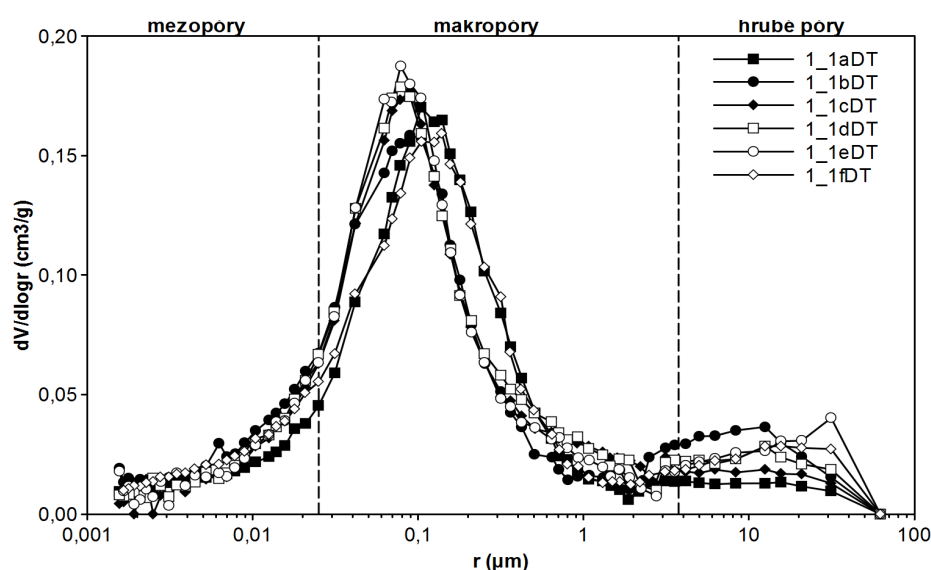
dostatečná na destrukci těchto hrudek, což má za důsledek zvýšené množství makropórů o poloměru mezi 1 - 3,75 μm a detekovaných hrubých pórů.

Pro studium změny pórového prostoru s rostoucí dobou zrání a rostoucím množstvím vápna byl obměněn postup přípravy vzorků (kapitola 7.2). Při něm byl největší důraz kladen na pečlivé zpracování vápna se studovanou zemínou.

7.2 Modifikovaná příprava zkušebních vzorků

600 g na vzduchu vysušené zeminy jsem zvlhčila pitnou vodou tak, aby bylo dosaženo takového rozmezí vlhkostí, které by umožnilo stanovit optimální vlhkost směsi. Po 24 hodinách jsem navlhčenou zeminu mísila po dobu 5 minut s 1% CaO tyčovým mixérem. Po 2 hodinách zrání při teplotě 22 – 25°C jsem celou směs hutnila energií PS odpovídající jedné vrstvě. Závislost ρ_d na w těchto těles s 1% CaO je znázorněna na obrázku 7.1. Pomocí tyčového mixéru se podařilo lépe zapracovat vápno do vlhké zeminy, čímž směs dosáhla vyšší optimální vlhkosti než zemina, kde bylo vápno zapracováno pouze ručně. Naopak změna způsobu míchání neměla dopad na flokulaci jílových částic, protože hodnota suché objemové hmotnosti směsi se snížila pouze o 7 kg/m^3 .

Vzorek o vlhkosti 22,9% a suché objemové vlhkosti 1595 kg/m^3 (výška 38 mm, průměr 100 mm) jsem zabalila do igelitového sáčku a uložila po dobu 1 dne do exikátoru částečně vyplněného vodou při teplotě 22 – 25°C. Těleso DT jsem poté rozdělila na 6 stejně velkých částí. Z každého z nich jsem odebrala po jednom vzorku (a, b, c, d, e, f), který byl usušen v lyofilizátoru. Zastoupení pórů v jednotlivých vzorcích bylo stanoveno pomocí MIP (Obr. 7.3).



Obrázek 7.3 Distribuce pórů vzorků a, b, c, d, e a f odebraných z tělesa zeminy s 1% CaO.

Zastoupení pórů v jednotlivých vzorcích se významně neliší. Objem nejčteněji se vyskytujících makropórů o poloměru kolem 0,1 μm se oproti původnímu způsobu přípravy (Obr. 7.2) zvýšil na hodnotu kolem 0,18 cm^3/g a hodnoty pórovitosti n_{MIP} jednotlivých vzorků se významně neliší (Tab. 7.2).

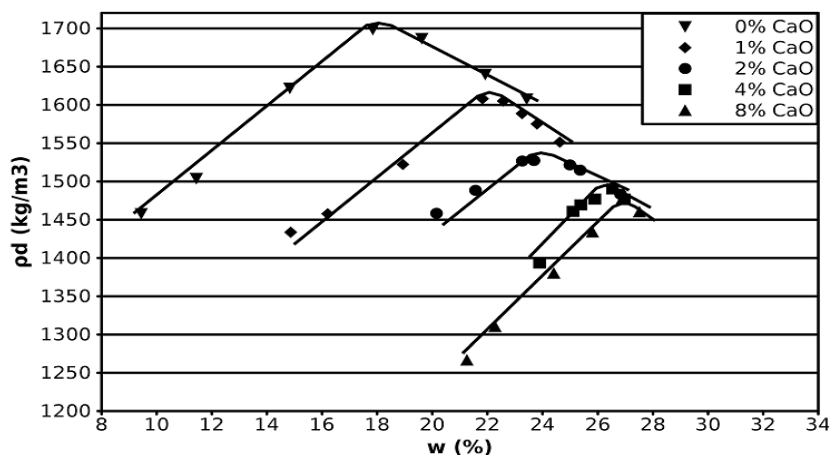
Tabulka 7.2 Pórovitost n_{MIP} vzorků a,b,c,d,e,f odebraných z dolní (DT) třetiny zeminy s 1% CaO po 1 dni zrání.

	1_1aDT	1_1bDT	1_1cDT	1_1dDT	1_1eDT	1_1fDT
n_{MIP} (%)	33,23	33,51	33,62	33,24	33,82	32,72

Zastoupení detekovaných pórů mezi jednotlivými vzorky se výrazně neliší a tento postup přípravy vzorků zajistil homogenitu pórového prostoru vápněného vzorku. Proto všechna tělesa (vápněná i nevápněná) určená pro zkoušky MIP a zkoušku propustnosti jsem připravila tímto modifikovaným způsobem.

7.3 Suchá objemová hmotnost – vlhkost

Na směsi zeminy s 0%, 2%, 4% a 8% CaO jsem stanovila závislost vlhkosti na její suché objemové hmotnosti (Obr. 7.4). Zeminu bez přídavku i s přídavkem vápna jsem připravila stejným postupem, který je popsán v kapitole 7.2.



Obrázek 7.4 Suchá objemová hmotnost – vlhkost zeminy s různým množstvím vápna hutněné energií PS v jedné vrstvě.

Maximální suchá objemová hmotnost klesá a optimální vlhkost zeminy roste s rostoucím množstvím vápna. Pokles suché objemové hmotnosti zeminy s rostoucím množstvím vápna je způsoben flokulací jílových částic.

7.4 Příprava vzorků pro měření pomocí MIP

Pro účely měření pórového prostoru pomocí MIP jsem připravila 4 hutněné vzorky s 1%, 2%, 4% a 8% CaO postupem uvedeným v kapitole 7.2. Směs po 2 hodinách od smísení vlhké zeminy s vápnem musela mít vlhkost v intervalu w_{opt} až $w_{\text{opt}}+2\%$ (Tab. 7.3). Hutněná tělesa jsem zabalila do igelitového sáčku a uskladnila v exikátoru s vodou při teplotě 22 – 25°C. Po 1, 7, 14, 28, 56, 120, 180, 240, 360 a 540 dnech zrání jsem odebírala z vápněných vzorků hroudičky o průměru 10 – 20 mm z centra vzorku, které byly po 1 dni sušení v lyofilizátoru proměřeny pomocí MIP.

Tabulka 7.3 Suché objemové hmotnosti a vlhkosti hutněné směsi spraše s 1%, 2%, 4% a 8% CaO dosažené po 2 hodinách zrání.

Směs zeminy s	w (%)	ρ_d (kg/m ³)
1% CaO	21,95	1618
2% CaO	23,95	1565
4% CaO	26,39	1501
8% CaO	26,90	1477

7.5 Příprava vzorků na propustnost

Zkušební tělesa s 0%, 1% a 8% CaO jsem pro zkoušku propustnosti připravila postupem podle kapitoly 7.2 a uskladnila je v igelitovém sáčku v exikátoru s vodou při laboratorních podmínkách při teplotě 22 – 25°C po dobu 1, 7, 14, 28 nebo 120 dní. Před zkouškou propustnosti jsem ořezáním připravila tělesa o výšce přibližně 35 mm a průměru přibližně 38 mm.

Při vyřezávání jsem z horní, střední a dolní části hutněného tělesa odebrala vzorky pro stanovení distribuce pórů pomocí MIP. Po 90 – 150 dnech propouštění jsem vzorek vyjmula z triaxiální komory a z horní, střední a dolní části zkušební tělesa jsem odebrala vzorek pro stanovení distribuce pórů pomocí MIP.

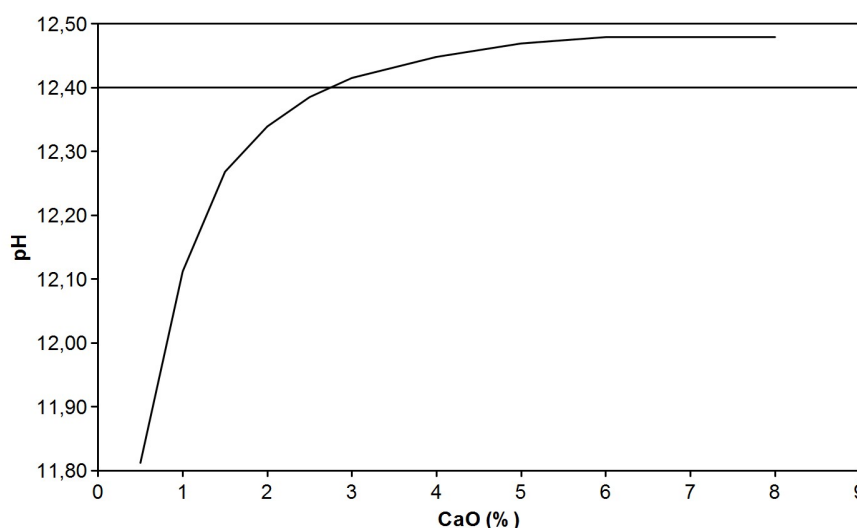
8. Výsledky – pH a konzistenční meze

Optimální množství vápna jsem stanovila čtyřmi různými metodami, jejichž výsledky jsem mezi s sebou porovnávala. Kromě stanovení OMV pomocí pH testu (Eades a Grim, 1966) jsem OMV vypočetla ze zrnitostního složení podle rovnice (3.2) (Hilt a Davidson, 1960). S použitím výsledků Sotorníka (2011) bylo možné ze závislosti I_p na množství vápna po 1 hodině zrání zeminy s vápnem (Eades a Grim, 1966) a ze závislosti w_p na množství vápna po 48 hodinách zrání zeminy s vápnem (Hilt a Davidson, 1960) stanovit OMV.

Dále jsem hodnoty pH vápenatých směsí měřila ve zvolených časových intervalech a z výsledků Sotorníka (2011) jsem mohla vyhodnotit vývoj konzistenčních mezí vápenatých směsí s časem.

8.1 Optimální množství vápna

Podle pH testu (Eades a Grim, 1966) jsem optimální množství vápna stanovila na 2,7% CaO (Obr. 8.1), kdy zemina s tímto množstvím vápna po 1 hodině zrání dosáhla pH 12,4.

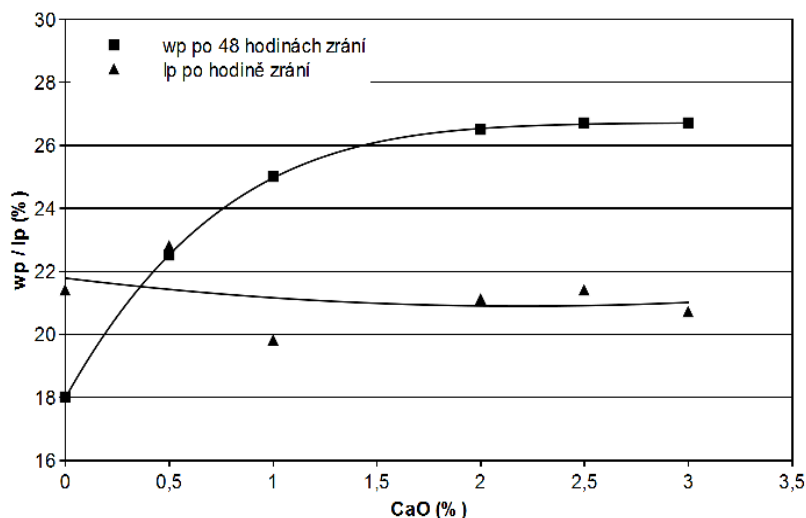


Obrázek 8.1 Vývoj pH s rostoucím množstvím vápna.

Podle rovnice (3.2) jsem stanovila OMV zkoumané zeminy ze znalosti zastoupení částic o velikosti menší než 0,002 mm. Spraš podle hustoměrné zkoušky obsahuje 20% jílových

částic. Pro tuto hodnotu jsem spočetla OMV na 1,8%.

Podle studie Hilt a Davidson (1960) jsem OMV stanovila z průběhu závislosti w_p na množství vápna po 48 hodinách zrání (Obr. 8.2).



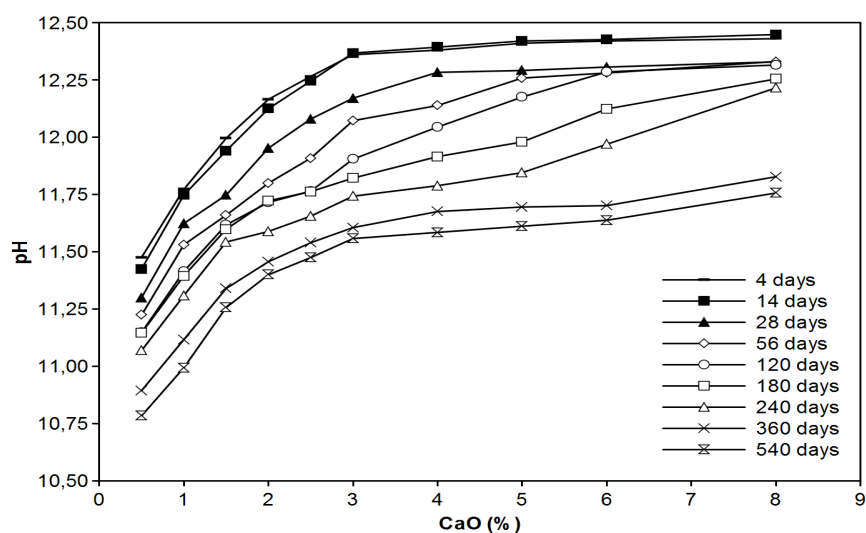
Obrázek 8.2 Vývoj w_p s rostoucím množstvím vápna po 48 hodinách zrání a vývoj I_p po 1 hodině zrání s rostoucím množstvím CaO (s využitím výsledků Sotorníka, 2011).

Hodnotu OMV jsem stanovila na 2% CaO, protože vlhkost se již s 2,5% ani 3% CaO významně nemění. Je nutno podotknout, že u směsí s 2%; 2,5% a 3% CaO po 48 hodinách zrání nebylo možné stanovit w_p bez dalšího přidání vody (Sotorník, 2011).

Na základě studie Eadese a Grima (1966) jsem zobrazila závislost indexu plasticity na množství vápna po 1 hodině zrání (Obr. 8.2) Ze závislosti nelze stanovit OMV, avšak Sotorník (2011) považuje 3% CaO za OMV, protože se již po hodině zrání stala směs zeminy s 3% CaO nezpracovatelná a konzistenční meze bez dalšího přidání vody nešlo stanovit.

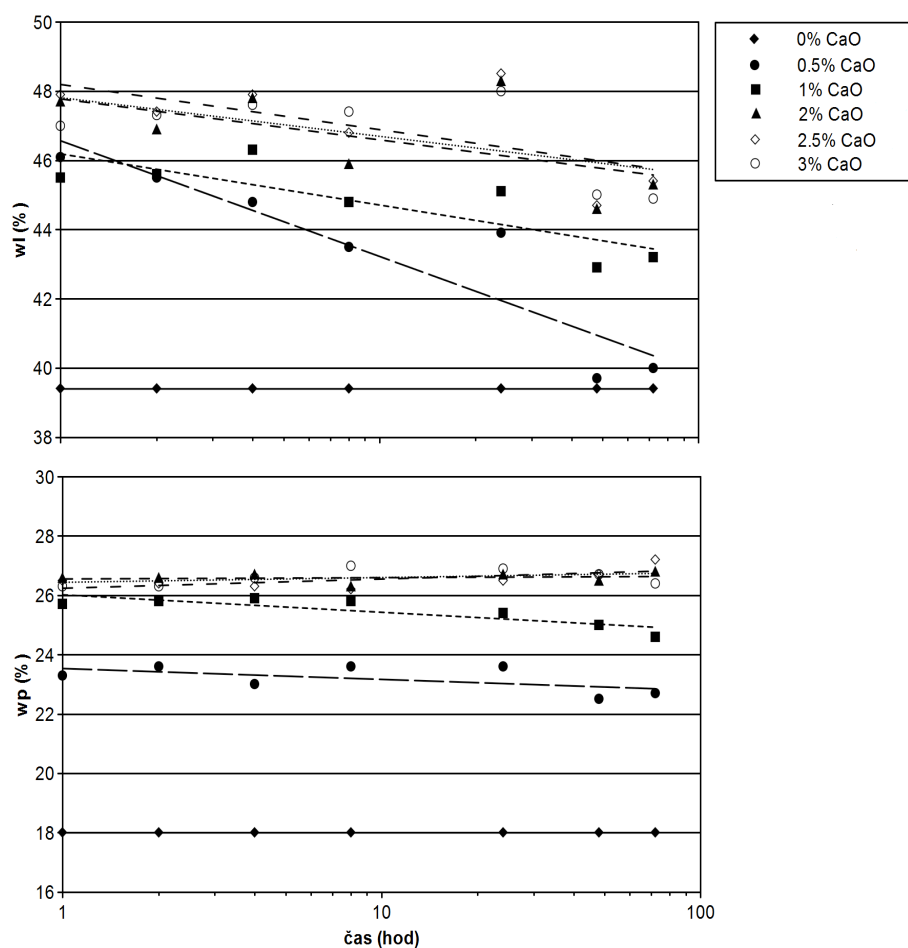
8.2 Vývoj pH s dobou zrání

Vývoj pH jsem měřila v průběhu 540 dní (Obr. 8.3).



Obrázek 8.3 Vývoj pH s dobou zrání.

pH směsi zeminy s vápnem roste s rostoucím množstvím vápna a klesá s rostoucí dobou zrání. Stejné trendy zaznamenali Al-Mukhtar et al. (2010a) nebo Metelková et al. (2014).



Obrázek 8.4 Vývoj w_L a w_P s rostoucí dobou zrání u směsi zeminy s 0%, 0,5%, 1%, 2%, 2,5% a 3% CaO (s využitím výsledků Sotorníka, 2011).

8.3 Vývoj konzistenčních mezí s dobou zrání

Vlhkost na mezi tekutosti roste v důsledku přidání vápna a klesá s rostoucí dobou zrání (Obr. 8.4). Pokles w_L s rostoucí dobou zrání bez ohledu na množství vápna zaznamenal i Osula (1996) na lateritech ($w_L = 39\%$, $I_p = 21,7\%$) s 1% - 3% vápna.

Vlhkost na mezi plasticity významně roste po přidání 0,5%; 1% a 2% CaO. Další nárůst množství vápna nemá vliv na hodnotu vlhkosti na mezi plasticity. Doba zrání nemá žádný vliv na změnu hodnoty w_p . Neměnnost w_p s dobou zrání zaznamenali i Rogers et al. (1997). Naopak Osula (1996) u lateritu ($w_L = 39\%$, $I_p = 21,7\%$) nebo Metelková et al. (2014) u jílu se střední až vysokou plasticitou ($w_L = 50\%$, $I_p = 23\%$) zaznamenali nárůst w_p s dobou zrání.

8.4 Shrnutí

Optimální množství vápna zkoumané spraše jsem stanovila podle pH testu na 2,7% CaO, podle metodiky Hilt a Davidsona (1960) na 2% CaO a podle metodiky Eadese a Grima (1966) na 3% CaO. Dále bylo OMV spočteno podle rovnice (3.2) uvedené v kapitole 3.2 na hodnotu 1,8% CaO. Vypočtená hodnota OMV nekorespondovala s výsledky OMV stanovené podle metodiky Eadese a Grima (1966), protože její správnost byla ověřena pouze na směsi montmorilonitického jílu s vápnem (Hilt a Davidson, 1960). Proto jsem výsledek rovnice (3.2) nevyužila pro výpočet průměrné hodnoty OMV.

Rogers et al. (1997) doporučují využít pro stanovení OMV závislost vlhkosti na mezi plasticity na množství vápna, protože se s časem nemění. Stanovení by však mělo proběhnout dříve než po 48 hodinách zrání, protože se po tak dlouhé době zrání směs zeminy s vápnem stane neplastická a pro stanovení w_p musí být do směsi dodatečně přidána voda (Sotorník, 2011; Metelková et al., 2014).

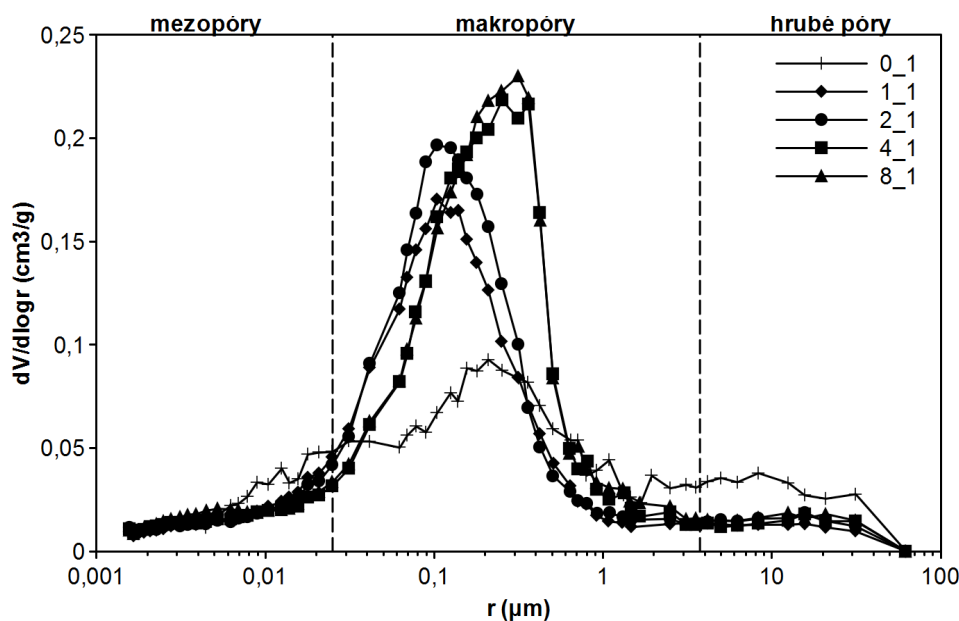
Výslednou hodnotu OMV studované spraše jsem stanovila jako průměr hodnot OMV stanovených pH metodou a ze závislosti I_p na množství vápna po hodině zrání (Eades a Grim, 1966) na 2,85% CaO.

9. Výsledky – rtuťová porozimetrie

Tabulkové a grafické výstupy frekvenčních křivek a souhrnnou zprávu o celkové pórovitosti n_{MIP} a o pórovitosti v rozsahu mezopórů ($r = 0,0015 - 0,0250 \mu m$), makropórů ($r = 0,0250 - 3,75 \mu m$) a hrubých pórů ($r = 3,75 - 100 \mu m$) byly vypočteny pomocí softwaru Autopore IV Micromeritics. Výsledky jsem graficky i statisticky zpracovala.

9.1 Vliv množství vápna na distribuci pórů a pórovitost n_{MIP}

Distribuce pórů zeminy s 0%, 1%, 2%, 4% a 8% CaO po 1 dni zrání jsou na obrázku 9.1.



Obrázek 9.1 Distribuce pórů zeminy s 0%, 1%, 2%, 4% a 8% CaO po 1 dni zrání.

Distribuci pórů zeminy bez přídavku vápna jsem porovnála s distribucí pórů neupravené zeminy stanovenou Le Runigem et al. (2009, Obr. 4.5) a Cusinierem et al. (2011, Obr. 4.10) na základě podobnosti s výsledky konzistenčních mezí a s obsahem částic o velikosti pod 0,002 mm u studované zeminy ($w_L = 35\%$, $I_P = 18\%$, 20% částic o velikosti pod 0,002 mm). Le Runigo et al. (2009) pracovali s prachovitou zeminu ($w_L = 37\%$, $I_P = 18,3\%$) s převahou křemene, živce a významným zastoupením smíšené struktury illit – smektit.

Obsah částic o velikosti pod 0,002 mm stanovili na 29,4% a zdánlivou hustotu pevných částic ρ_s na 2,69 Mg/m³. Cusinier et al. (2011) pracovali s prachovitou zeminu ($w_L = 32,5\%$, $I_p = 12,7\%$) s převahou křemene a kaolinitu. Obsah částic o velikosti pod 0,002 mm stanovili na 25%, obsah částic o velikosti pod 0,08 mm na 90% a zdánlivou hustotu pevných částic ρ_s na 2,68 Mg/m³. V tabulce 9.1 jsou uvedeny vlhkosti a suché objemové hmotnosti, při které byly zeminy bez přídavku vápna hutněny.

Tabulka 9.1 Porovnání vlhkosti a suché objemové hmotnosti zeminy s 0% , 1% nebo 3% vápna stanovené Cusinierem et al. (2011) po 28 dnech zrání, Le Runigem et al. (2009) po 0 dnech zrání a Metelkovou et al. (2012) po 1 dni zrání.

Obsah vápna	Cusinier et al. (2011)		Le Runigo et al. (2009)		Metelková et al. (2012)	
	w (%)	ρ_d (kg/m ³)	w (%)	ρ_d (kg/m ³)	w (%)	ρ_d (kg/m ³)
0%	15	1720	16	1760	16,5	1716
1%	-	-	21	1663	21,95	1618
3%	19,2	1600	23,1	1602	-	-

Suchá objemová hmotnost studované neupravené zeminy je velmi blízká suché objemové hmotnosti zeminy stanovené Cusinierem et al. (2011), naopak suchá objemová hmotnost podle Le Runigo et al. (2009) je o 40 kg/m³ vyšší, což je pravděpodobně způsobeno odlišným způsobem hutnění (kapitola 4.1). U všech studovaných zemin byl zjištěn monodisperzní tvar křivky pórového prostoru. Ve studované zemině jsou nejčastěji zastoupeny póry o poloměru 0,2 μ m, naopak u zeminy připravené Le Runigem et al. (2009) jsou to póry o poloměru 0,6 μ m a u zeminy připravené Cusinierem et al. (2011) jsou to póry o poloměru 0,9 μ m. Tyto rozdíly mohou být způsobeny nejen odlišným zrnitostním složením jednotlivých zemin, ale také odlišným způsobem přípravy těles. Naopak zvýšený výskyt pórů o poloměru větším než 1 μ m u studované zeminy (Obr. 9.1) je pravděpodobně způsoben tím, že zemina byla hutněna při vlhkosti lehce pod její optimální vlhkost.

Distribuci pórů zeminy s 1% vápna jsem porovnávala s distribucí pórů zeminy upravené 1% vápna stanovenou Le Runigem et al. (2009, Obr. 4.6). Na rozdíl od bidisperzních křivek, které pozorovali Le Runigo et al. (2009, Obr. 4.6) na vápněné směsi hutněné při vlhkosti (Tab. 9.1), má pórový prostor studované vápněné zeminy monodisperzní tvar a to bez ohledu na množství přidaného vápna. Přimícháním 1% a 2% CaO do zeminy se významně zvyšuje množství makropórů o poloměru 0,025 – 0,35 μ m a po přimíchání 4% a 8% CaO se významně zvyšuje množství makropórů o poloměru 0,025 – 0,6 μ m. Le Runigo et al. (2009) zaznamenali značný nárůst počtu pórů o poloměru 0,01 – 0,2 μ m po přidání 1% a 3% CaO

do zeminy ($w_L = 37\%$, $I_P = 18,3\%$) a Cusinier et al. (2011) zaznamenali nárůst počtu pórů o poloměru menší než $0,15 \mu\text{m}$ po přidání 2% a 3% CaO do zeminy ($w_L = 32,5\%$, $I_P = 12,7\%$). Tyto změny pórového prostoru autoři přičítají flokulaci jílových částic vlivem přidání vápna, která má za následek zvýšení pórovitosti n_{MIP} s rostoucím množstvím vápna, což lze pozorovat také u studovaného materiálu (Tab. 9.2).

Tabulka 9.2 Pórovitost n_{MIP} vzorků s 0% - 8% CaO po 1 dni zrání.

Obsah CaO	0%	1%	2%	4%	8%
n_{MIP} (%)	32,1	33,2	35,2	38,2	39,1

Zvýšení n_{MIP} má za následek pokles suché objemové hmotnosti vápněné zeminy (Tab. 7.3).

Stejně jako v práci Le Runiga et al. (2009) nebo Cusiniera et al. (2011) se množství hrubých pórů studovaných směsí výrazně nezměnilo přidáním vápna a nezměnilo se ani s rostoucím množstvím vápna. Na rozdíl od uvedených autorů nebyl pozorován nárůst množství mezopórů vlivem přidání vápna ani s rostoucím množstvím vápna, což je pravděpodobně způsobeno rozdílným mineralogickým složením (kapitola 11).

9.2 Vliv doby zrání na distribuci pórů

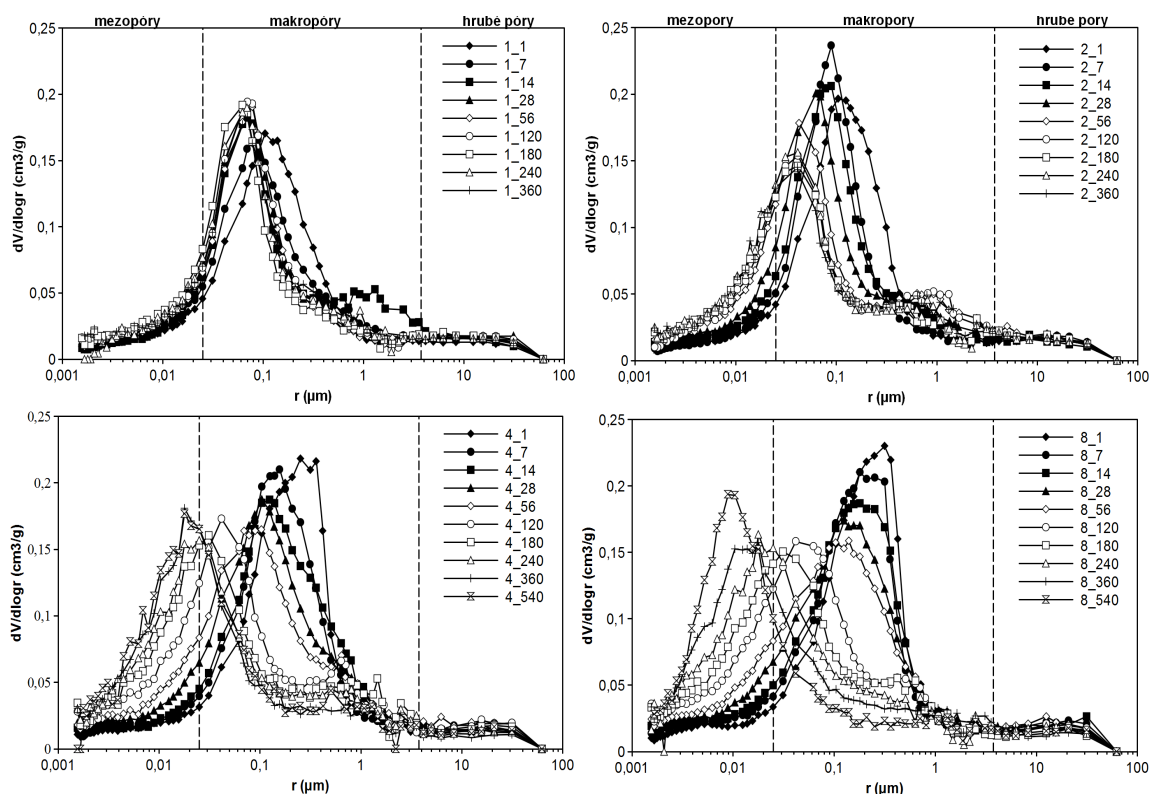
Distribuce pórů zeminy s 1%, 2%, 4% a 8% CaO po 1, 7, 14, 28, 56, 120, 180, 240, 360 a 540 dnech zrání jsou na obrázku 9.2. Frekvenční křivky lze charakterizovat hodnotou největší četností pórů o poloměru r_{mode} , kterým odpovídá objem V_{mode} . Vývoj hodnot r_{mode} s dobou zrání u zeminy s 1% - 8% CaO je uveden v tabulce 9.3 a vývoj hodnot V_{mode} lze pozorovat na obrázku 9.2.

Tabulka 9.3 Vývoj r_{mode} (μm) s rostoucím množstvím vápna a s dobou zrání.

Doba zrání (dny)	1	7	14	28	56	120	180	240	360	540
1% CaO	0,104	0,089	0,070	0,068	0,068	0,070	0,063	0,069	0,070	-
2% CaO	0,104	0,089	0,089	0,063	0,042	0,042	0,042	0,042	0,041	-
4% CaO	0,252	0,157	0,125	0,105	0,104	0,042	0,031	0,025	0,021	0,021
8% CaO	0,315	0,180	0,180	0,125	0,104	0,042	0,031	0,025	0,018	0,010

U vzorku s 1% CaO se r_{mode} zmenšuje a V_{mode} mírně narůstá během prvních 28 dnů zrání, poté již rostoucí doba zrání nemá vliv na změnu r_{mode} ani na změnu V_{mode} . U vzorku s 2% CaO hodnoty r_{mode} a V_{mode} klesají během 56 dní zrání, poté během následujících 64 dní zrání se

mírně sníží V_{mode} beze změny r_{mode} . Po 120 dnech zrání již nejsou pozorovatelné změny V_{mode} ani r_{mode} .



Obrázek 9.2 Distribuce pórů zeminy s 1%, 2%, 4% a 8% CaO po 1, 7, 14, 28, 56, 120, 240, 360 a 540 dnech zrání.

U zeminy s 4% a 8% CaO se r_{mode} a V_{mode} snižuje během 56 dní zrání, poté s rostoucí dobou zrání pokračuje pokles r_{mode} avšak bez dalších významných změn V_{mode} , jen u vzorku s 8% CaO V_{mode} mírně vzrůstá po 540 dnech zrání.

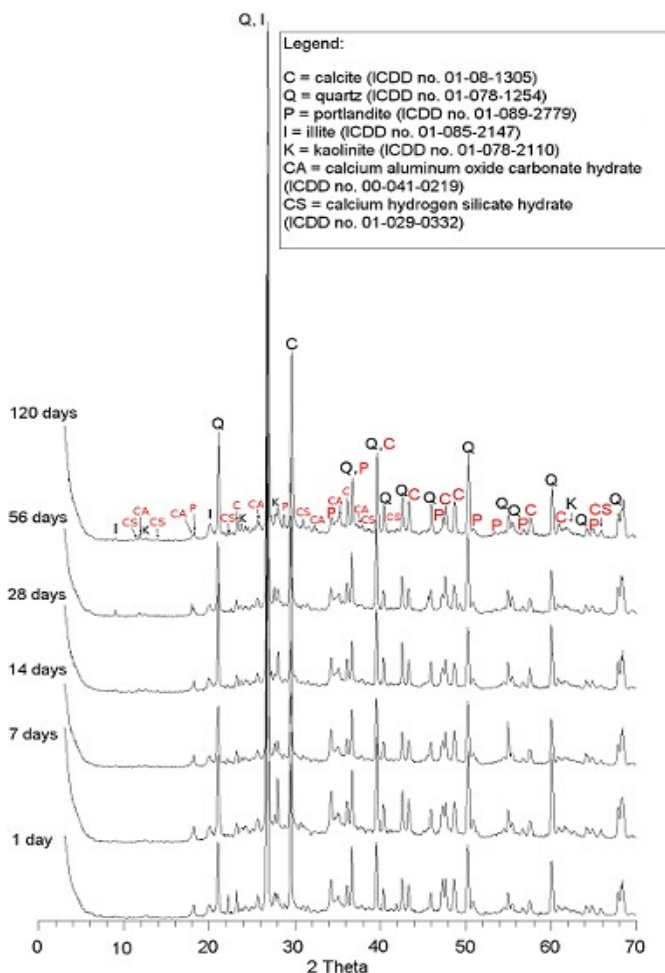
Podobné změny distribuce pórů s dobou zrání popsali Choquette et al. (1987, Obr. 4.20) nebo Le Runigo et al. (2009, Obr. 4.6) a přisuzují je tvorbě portlanditu a novotvořených fází. Z těchto důvodů bylo u zeminy upravené přídavkem 8% CaO po 1, 7, 14, 28, 56 a 120 dnech zrání studováno její fázové složení pomocí práškového RTG difrakčního rozboru. Měření bylo provedeno v Laboratoři RTG difrakce, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze.

9.2.1 Výsledky RTG difrakce

Data získaná z rentgenového difraktometru vyhodnotil Prof. Richard Přikryl, Dr. v počítačovém programu X'Pert HighScore (Obr. 9.3).

První den zrání byl detekován kalcit, který je však primárně přítomen v neupravené zemině. Částečně mohl vzniknout i při karbonataci portlanditu vlivem CO_2 , ale to bohužel nelze

porovnáním RTG záznamů upravené a neupravené zeminy odlišit. Po 7 dnech zrání bylo možno detekovat novotvořený minerál typu $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{CO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ (JCPDS no. 00-041-0219). Také byly po 56 dnech zrání detekovány fáze $\text{Na}_6\text{Ca}_2\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (JCPDS no. 00-046-1332), $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (JCPDSno. 00-016-0333), $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ (JCPDS no. 00-036-1465) a $\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 1,7\text{H}_2\text{O}$ (JCPDS no. 00-021-0132), avšak nedosahovaly už takové intenzity. Po 120 dnech zrání byl pozorován hydrocalumite.

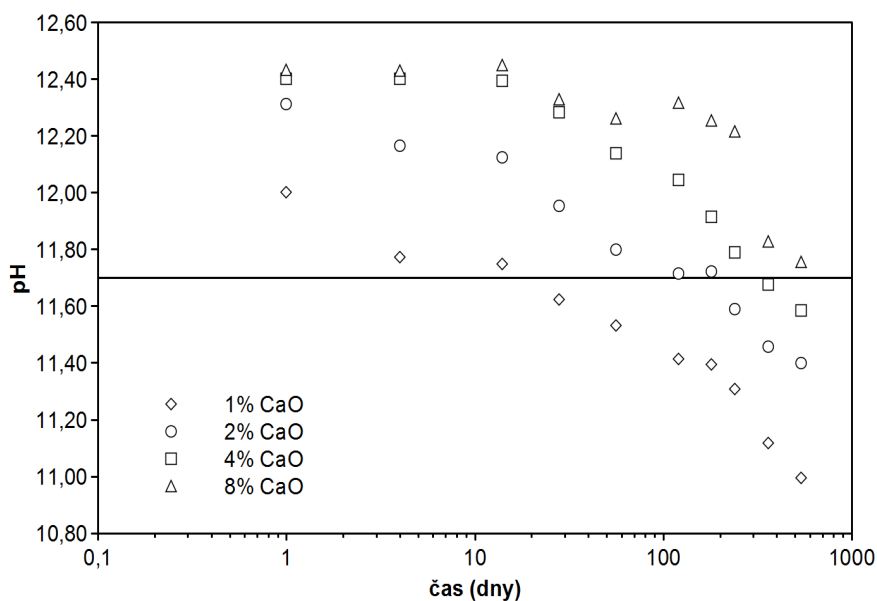


Obrázek 9.3 RTG difrakce spráše s 8%CaO po 1, 7, 14, 28, 56, a 120 dnech zrání.

Výsledky RTG difrakce potvrdily, že s rostoucí dobou zrání postupně krystalizují novotvořené fáze typu hydratovaných vápenatých hlinitanů a hlinitokřemičitanů. Ty se podílejí na změně pórového prostoru nejen u zeminy s 8% CaO, ale lze jim přisoudit i změnu pórového prostoru u zeminy s 4% CaO, protože obě množství vápna jsou nad stanovenou hodnotou OMV studované zeminy a podle studie Eadese a Grima (1966) by měl být zajištěn průběh pucolánových reakcí. U směsí zeminy s 4% a 8% CaO se pravděpodobně prvních 56 dní zrání vytváří novotvořené fáze po obvodu pórů, a proto klesá s dobou zrání nejen r_{mode} ale i V_{mode} . V analogii s výsledky práce Choquette et al. (1987) lze předpokládat, že

s další rostoucí dobou zrání novotvořené fáze přepaží jednotlivé póry, což způsobí pokles r_{mode} s rostoucí dobou zrání, ale neovlivní to V_{mode} .

I když 2% CaO jsou pod stanovenou hodnotou OMV studované zeminy, lze v průběhu 56 dní zrání sledovat také pokles nejen r_{mode} ale i V_{mode} a po následujících 64 dní zrání mírný pokles V_{mode} bez změny r_{mode} . Eades a Grim (1966) pozorovali nárůst pevnosti vápněné směsi, dokud pH směsi nekleslo pod hodnotou 11. Proto jsem zobrazila vývoj pH směsi zeminy s 1%, 2%, 4% a 8% CaO s rostoucí dobou zrání (Obr. 9.4).



Obrázek 9.4 Vývoj pH s rostoucí dobou zrání u zeminy s 1% - 8% CaO.

Hodnota pH klesá s rostoucí dobou zrání. Změny distribuce pórů detekovaných MIP lze pozorovat nad hodnotu pH kolem 11,7.

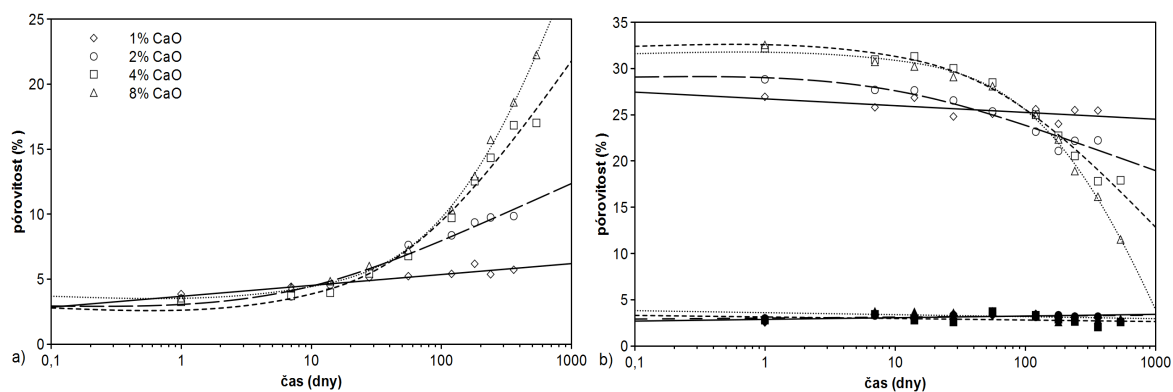
9.3 Vliv doby zrání na pórovitost n_{MIP}

Celková pórovitost n_{MIP} (Tab. 9.4) byla spočtena automaticky pomocí softwaru Autopore IV Micromeritics pro každou frekvenční křivku (Obr. 9.2). Změna pórovitosti n_{MIP} s dobou zrání je u zeminy s 1% a 2% CaO velmi malá a blízká přesnosti metody MIP ($\pm 0,5\%$). U zeminy s 4% a 8% CaO pórovitost n_{MIP} pozvolna klesá s rostoucí dobou zrání.

Tabulka 9.4 Vývoj pórovitosti n_{MIP} (%) s rostoucím množstvím vápna a dobou zrání.

Doba zrání (dny)	1	7	14	28	56	120	180	240	360	540
1% CaO	33,2	33,5	33,9	33,5	33,5	34,4	33,5	33,9	34,1	-
2% CaO	35,2	34,5	35,0	35,4	36,5	34,6	33,7	35,5	35,2	-
4% CaO	38,2	38,0	38,0	38,0	38,9	38,0	38,1	37,4	37,6	37,5
8% CaO	39,1	38,7	38,7	38,5	39,0	38,5	37,8	37,7	37,5	36,6

Pro lepší statistické vyhodnocení změny pórovitosti n_{MIP} s dobou zrání byla spočtena pórovitost pro každou skupinu pórů (mezopóry, makropóry a hrubé póry, Obr. 9.5). Pórovitost mezopórů, makropórů a hrubých pórů byla podrobena statistické analýze (Tab. 9.5).



Obrázek 9.5 Vývoj a) pórovitosti mezopórů, b) pórovitosti makropórů (prázdné znaky) a hrubých pórů (plné znaky) s rostoucí dobou zrání pro směsi zeminy s různým obsahem vápna spojnice trendu pro 1% CaO (plná čára), pro 2% CaO (přerušovaná čára), pro 4% CaO (čárkovaná čára) a pro 8% CaO (tečkovaná čára).

Rostoucí množství vápna ani rostoucí doba zrání nemá žádný vliv na pórovitost hrubých pórů (Obr. 9.5b). Pórovitost makropórů roste s rostoucím množstvím vápna a významně klesá s rostoucí dobou zrání, a to především u zeminy s 2%, 4% a 8% CaO (Obr. 9.5b). Rostoucí množství vápna má zanedbatelný vliv na pórovitost mezopórů, avšak jeho vliv roste s rostoucí dobou zrání (Obr. 9.5a).

Pro popis nelineární závislosti změny pórovitosti na době zrání jsem použila Spearmanův koeficient korelace R_{xy} . Pearsonův koeficient korelace r_{xy} jsem zvolila pro popis lineárního vývoje pórovitosti s rostoucí dobou zrání (Tab. 9.5).

Tabulka 9.5: Spearmanův koeficient korelace R_{xy} a Pearsonův koeficient korelace r_{xy}

Obsah CaO	mezopóry	makropóry		hrubé póry
	R_{xy}	R_{xy}	r_{xy}	r_{xy}
1% CaO	0,900	-	0,667	0,510
2% CaO	1,000	0,933	-	0,395
4% CaO	1,000	0,976	-	0,292
8% CaO	1,000	1,000	-	0,485

Při 5% hladině významnosti jsem spočetla podle t-testu s $n-2$ stupni volnosti, kde n bylo pro zeminu s 1% a 2% CaO roven 9 a pro zeminu s 4% a 8% CaO roven 10, kritický koeficient korelace r_p . Pokud $R_{xy} > r_p$ nebo $r_{xy} > r_p$ ($r_p = 0,664$ pro $n = 9$ a $r_p = 0,632$ pro $n = 10$), pak korelace mezi pórovitostí a dobou zrání je potvrzena.

Pearsonův koeficient korelace nevykazuje žádnou korelaci mezi pórovitostí hrubých pórů s časem u všech směsí zeminy s 1%, 2%, 4% a 8% CaO. Statisticky významné jsou však změny pórovitosti mezopórů a makropórů s časem u všech směsí. U zeminy s 1% CaO lze tyto změny pozorovat během prvních 28 dnů zrání, u zeminy s 2% CaO během 120 dnů zrání, u zeminy s 4% CaO během 360 dnů zrání a u zeminy s 8% CaO během 540 dnů zrání.

9.4 Shrnutí

V kapitole 9 byly graficky i statisticky vyhodnoceny výsledky vlivu rostoucího množství vápna a rostoucí doby zrání na vývoj pórového prostoru vápněné spraše. Analýza pórového prostoru byla provedena na směsi studované zeminy s 0 – 8% CaO hutněné energií Proctor standard při vlhkosti blízké optimální vlhkosti odpovídající dané směsi. Distribuce pórového prostoru směsi zeminy 0% CaO byla porovnána s distribucí pórů zeminy, kterou publikovali Le Runigo et al. (2009) nebo Cusinier et al. (2011). U všech zemin byl detekován monodisperzní tvar křivky, které se však vzájemně lišily hodnotou poloměru nejčteněji zastoupených pórů.

Monodisperzní tvar křivky pórového prostoru studované zeminy zůstává zachován i po přimíchání vápna a tvar křivky se nemění ani s rostoucím množstvím vápna. Po 1 dni zrání směsi zeminy s 1% a 2% CaO se významně zvyšuje množství makropórů o poloměru 0,025 – 0,35 μm a u směsi s 4% a 8% CaO se významně zvyšuje množství makropórů o poloměru 0,025 – 0,6 μm . Tyto změny pórového prostoru lze přičíst flokulaci jílových částic vlivem přidání vápna, která má za následek zvýšení pórovitosti n_{MIP} s rostoucím množstvím vápna, a tedy poklesu suché objemové hmotnosti vápněné zeminy. Flokulace však neovlivnila zastoupení mezopórů ani hrubých pórů.

Změny v intervalech distribuce pórů u směsi zeminy s 1%, 2%, 4% a 8% CaO byly sledovány po dobu 540 dnů. Každá křivka pórového prostoru byla vyjádřena hodnotou největší četností pórů o poloměru r_{mode} , které odpovídá objemu V_{mode} . U vzorku s 1% CaO se r_{mode} zmenšuje a V_{mode} mírně narůstá během prvních 28 dnů zrání, poté již rostoucí doba zrání nemá vliv na změnu r_{mode} ani na změnu V_{mode} . Naopak u vzorků s 2%, 4% a 8% CaO hodnoty r_{mode} a V_{mode} klesají během 56 dní zrání. U starších vzorků změny V_{mode} nejsou pozorovatelné, pouze pokračuje pokles r_{mode} , který u vzorku s 2% CaO byl ukončen po 120 dnech zrání, u vzorku s 4% CaO po 360 dnech zrání a u vzorku s 8% CaO pokračuje i po 540 dnech zrání. Ukončení poklesu r_{mode} spojují s ukončením tvorby nových fází, které se podílejí na změně pórového prostoru vápněných zemin. Změny distribuce pórů detekovaných MIP lze pozorovat nad hodnotu pH kolem 11,7.

Pórovitost byla též vyčíslena pro každou skupinu pórů (mezopóry, makropóry a hrubé póry) samostatně. U zeminy s 1% CaO pórovitost makropórů klesá a pórovitost mezopórů roste během prvních 28 dní zrání vlivem vzniku portlanditu. Poté už nebyly detekovány žádné změny v pórovém prostoru. Naopak u zeminy s 2% CaO během prvních 120 dní zrání a u zeminy s 4% CaO během prvních 360 dnů zrání pórovitost makropórů klesá a pórovitost mezopórů roste vlivem vzniku novotvořených fází (CAH a CASH). U zeminy s 8% CaO změny pórovitosti jsou dokonce znatelné i po 540 dnech zrání. Pórovitost hrubých pórů se nemění ani s rostoucím množstvím vápna ani s rostoucí dobou zrání. S rostoucí dobou zrání se mění pouze distribuce pórů o poloměru pod 0,5 μm pro směs zeminy s 1% a 2% CaO a o poloměru pod 1 μm pro směs zeminy s 4% a 8% CaO.

10. Výsledky – hydraulická vodivost a změna distribuce pórů vlivem propouštění

Vývoj hydraulické vodivosti jsem sledovala na směsi s obsahem vápna pod stanovenou hodnotu OMV (1% CaO) a na směsi s obsahem vápna nad stanovenou hodnotu OMV (8% CaO). Tyto směsi byly vybrány na základě výsledků z MIP (kapitola 9). U zeminy s 8% CaO byly změny pórového prostoru pozorovány během 540 dní zrání a u směsi zeminy s 1% CaO pouze během prvních 28 dní zrání. Cílem bylo zjistit, zda popsané změny pórového prostoru budou mít vliv na hydraulickou vodivost vápněné zeminy. Hydraulickou vodivost jsem také stanovila na neupraveném vzorku studované zeminy.

10.1 Neupravená zemina

Neupravený vzorek 0a_1 o průměru 34,75 mm a výšce 37,88 mm jsem ručně vyřezala po 1 dni zrání z hutněného tělesa o vlhkosti 20,9% a suché objemové hmotnosti 1643 kg/m³. Během vyřezávání vzorku jsem ze střední části tělesa odebrala vzorek s označením 0a_1MT_pred_prop pro analýzu MIP. Vzorek 0a_1 jsem zvažila a změřila a osadila do propustoměru.

Tabulka 10.1 Fyzikální parametry vzorku 0a_1 spočtené před zkouškou propustnosti, po 35 dnech sycení a po 41 dnech sycení.

	w	ρ_d	S	n
	(%)	(kg/m ³)	(%)	(%)
Před zk propustnosti	20,5	1649	85,9	39,4
Po 35-ti dnech propouštění	21,1	1656	89,2	39,1
Po 41 dnech propouštění	21,8	1653	91,9	39,2

Hydraulickou vodivost vzorku jsem měřila po dobu 35-ti dnů. Fyzikální parametry vzorku před zkouškou propustnosti a po 35 dnech propouštění jsou uvedeny v tabulce 10.1. Po

ukončení zkoušky propustnosti a po kontrole hmotnosti a rozměrů vzorku 0a_1 jsem vzorek opět osadila do propustoměru na dalších 6 dní. Cílem bylo zjistit, zda se vzorek během 35 dní propouštění nasytil.

Po 41 dnech jsem zkoušku propustnosti vzorku 0a_1 opět přerušila. Vzorek jsem vyjmula z komory, změřila ho a zvažila (Tab. 10.1). Z dolní (0a_1DD_41) a horní (0a_1HD_41) podstavy jsem odřezala vzorky na zkoušku MIP. Poté jsem vzorek opět změřila, zvažila (Tab. 10.2) a znovu jsem ho osadila do propustoměru.

Tabulka 10.2 Fyzikální parametry zeminy s 0% CaO po 1 dni zrání spočtené po ořezání dolní a horní podstavy před a po zkoušce propustnosti.

	w	ρ_d	S	n
	(%)	(kg/m ³)	(%)	(%)
Po ořezání podstav	22	1684	88,9	38,9
Po 101 dnech propouštění	22,2	1669	95,9	38,7

Zkoušku propustnosti nevápněného vzorku jsem ukončila po 101 dnech propouštění. Po ukončení zkoušky propustnosti jsem odebrala vzorky z dolní (0a_1DD_po_prop) a horní (0a_1HD_po_prop) podstavy a také ze střední části vzorku (0a_1MT_po_prop) a podrobila jsem je zkoušce MIP (Obr. 10.2).

Dále jsem měřila hydraulickou vodivost vzorku 0b_1 o průměru 101,1 mm a výšce 36,55 mm po dobu 93 dní bez přerušení (Tab. 10.3). U tohoto vzorku jsem neodebrala vzorky na zkoušku MIP.

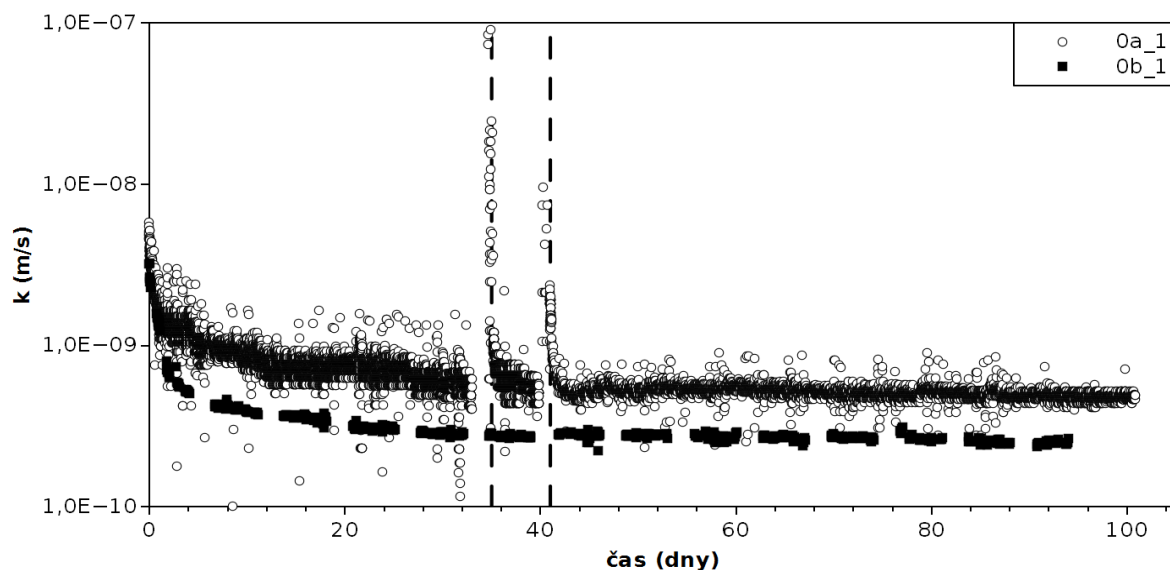
Tabulka 10.3 Fyzikální parametry zeminy s 0% CaO po 1 dni zrání před a po zkoušce propustnosti.

	w	ρ_d	S	n
	(%)	(kg/m ³)	(%)	(%)
Před zk propustnosti	18,9	1720	87,3	37,3
Po zk propustnosti	21,9	1707	100	37,3

10.1.1 Hydraulická vodivost neupravené zeminy

Na obrázku 10.1 je průběh hydraulické vodivosti během dlouhodobého propouštění vody dvěma vzorky zeminy s 0% CaO po 1 dni zrání (0a_1, 0b_1). Přerušované čáry na obrázku 10.1 v čase 35 a 41 dní poukazují na opětovné osazení vzorku 0a_1. Po zhruba 40-ti dnech propouštění zůstává hodnota hydraulické vodivosti s rostoucí dobou propouštění

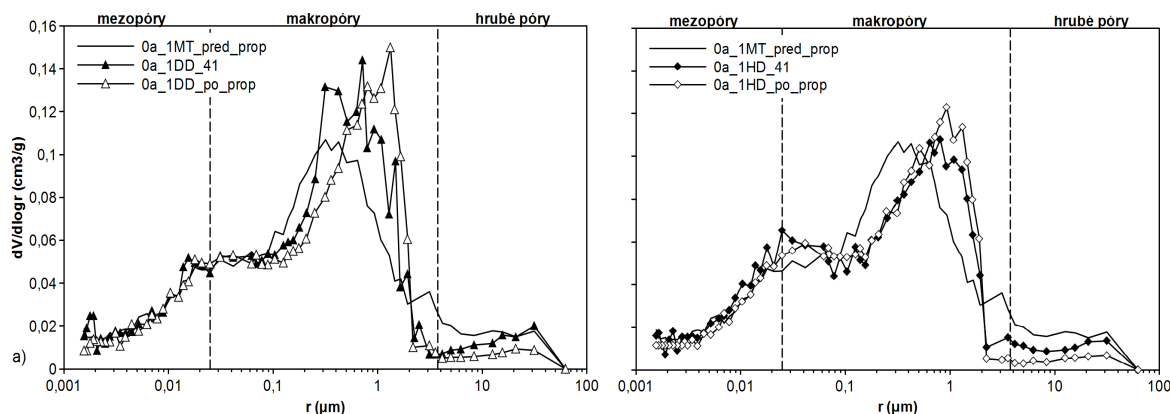
konstantní. Vzorek 0b_1 dosahuje nižší hodnoty hydraulické vodivosti než vzorek 0a_1 ve stejném čase propouštění. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že vzorek 0b_1 má vyšší suchou objemovou hmotnost, respektive nižší pórovitost než má vzorek 0a_1.



Obrázek 10.1 Průběh hydraulické vodivosti zeminy s 0% CaO po 1 dni zrání.

10.1.2 Výsledky rtuťové porozimetrie neupravené zeminy

Na obrázku 10.2 je zobrazeno porovnání distribuce pórů nevápněné zeminy před zkouškou propustnosti s distribucí pórů vzorků odebraných z dolní (DD) nebo horní (HD) podstavy po 41 a 101 dnech propouštění.



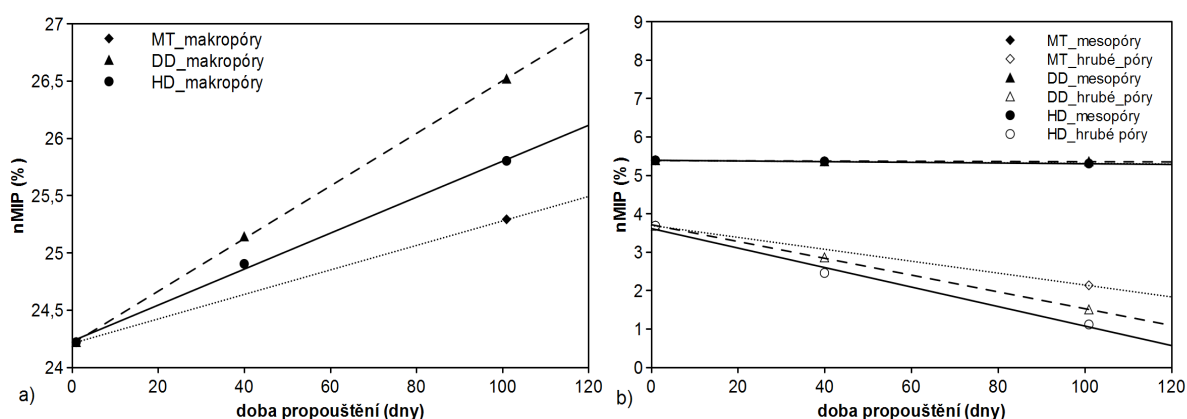
Obrázek 10.2 Porovnání distribuce pórů vzorku neupravené zeminy před zkouškou propustnosti s distribucí pórů vzorků odebraných z a) dolní (DD) nebo b) horní (HD) podstavy po 41 a 101 dnech propouštění.

U vápnem neupravené zeminy je patrná monodisperzní pórová struktura, která zůstává zachována i s rostoucí dobou propouštění. Distribuce pórů o poloměru pod $0,1\ \mu\text{m}$ zůstává

po celou dobu propouštění nezměněna, naopak je tomu u distribuce pórů o poloměru větší než $0,1\ \mu\text{m}$. r_{mode} frekvenčních křivek se zvyšuje. Nárůst hodnoty r_{mode} s rostoucí dobou propouštění je u dolní podstavy postupný na rozdíl od horní podstavy vzorku. Naopak u horní podstavy vzorku se r_{mode} stanovené po 41 a 101 dnech propouštění významně neliší, avšak V_{mode} mírně roste, což je pravděpodobně způsobeno poklesem pórů o poloměru $2 - 60\ \mu\text{m}$. Pro lepší zhodnocení procesů probíhající v neupravené zemině během doby propouštění jsem statisticky vyhodnotila změny pórovitosti n_{MIP} pro každou skupinu pórů s rostoucí dobou propouštění.

10.1.3 Statistické vyhodnocení výsledků rtuťové porozimetrie neupravené zeminy

Pórovitost n_{MIP} byla spočtena pomocí softwaru Autopore IV Micromeritics pro každou skupinu pórů (mezopóry, makropóry a hrubé póry) detekovanou metodou MIP před zkouškou propustnosti a po 41 dnech a 101 dnech propouštění (Obr. 10.3).



Obrázek 10.3 Vývoj pórovitosti a) makropórů a b) mezopórů a hrubých pórů u dolní podstavy (DD, čárkovaná čára), u horní podstavy (HD, plná čára) a ve středu vzorku (MT, tečkovaná čára) s rostoucí dobou propouštění.

Pórovitost mezopórů se vlivem doby propouštění nemění, naopak pórovitost makropórů roste a pórovitost hrubých pórů klesá po celou dobu propouštění bez ohledu na místo odběru v rámci vzorku. Naměřené změny pórovitosti makropórů a hrubých pórů bych nepřisuzovala působení efektivního napětí, které zůstává konstantní po celou dobu zkoušky propustnosti (okolo 10 kPa). Boyton a Daniel (1985) na zhuťném jílu ($w_L = 53\%$, $I_p = 18\%$), který po třech dnech vysychání při teplotě $25,6^\circ\text{C}$ osadili do propustoměru při efektivním napětí 14, 28, 56 a 105 kPa, prokázali, že až při napětí 28 kPa dochází k uzavírání poruch. Po ukončení zkoušky propustnosti na neupraveném vzorku zeminy 0b_1, kdy jsem nezasahovala

do průběhu zkoušky, jsem nezaznamenala pokles pórovitosti n s rostoucí dobou propouštění. Změny v pórovitosti tedy přičítám spíše poškození vzorku vlivem manipulace.

10.2 Zeminy upravené 1% CaO

Vzorky upravené 1% CaO o průměru přibližně 35 mm a výšce přibližně 38 mm jsem ručně vyřezala po 1, 7 a 14 dnech zrání z hutněných těles, jejichž vlhkost a suchá objemová hmotnost je uvedena v tabulce 10.4. Vzorek 1_1b_acz jsem nevyřezávala, takže měl průměr 101 mm a výšku přibližně 38 mm, a vzorek 1_28 měl průměr 50 mm a výšku přibližně 38 mm.

Tabulka 10.4 Vlhkosti a suché objemové hmotnosti hutněných vzorků stanovených po hutnění.

Označení vzorku	w (%)	ρ_d (kg/m ³)
1b_1uk	23,3	1567
1_1b_acz	23,3	1584
1a_7	23,1	1569
1a_14	23,1	1570
1_28	21,6	1595

Během vyřezávání vzorků jsem ze střední části tělesa odebrala vzorek pro analýzu MIP, to znamená, že na vzorku 1_1b_acz nebyla provedena analýza MIP. Vzorky jsem zvážila, změřila a osadila je do propustoměru. Fyzikální parametry vzorků s 1% CaO vypočtené před a po zkoušce propustnosti jsou uvedeny v tabulce 10.5.

Tabulka 10.5 Fyzikální parametry zeminy s 1% CaO po 1, 7, 14 a 28 dnech zrání spočtené před a po zkoušce propustnosti.

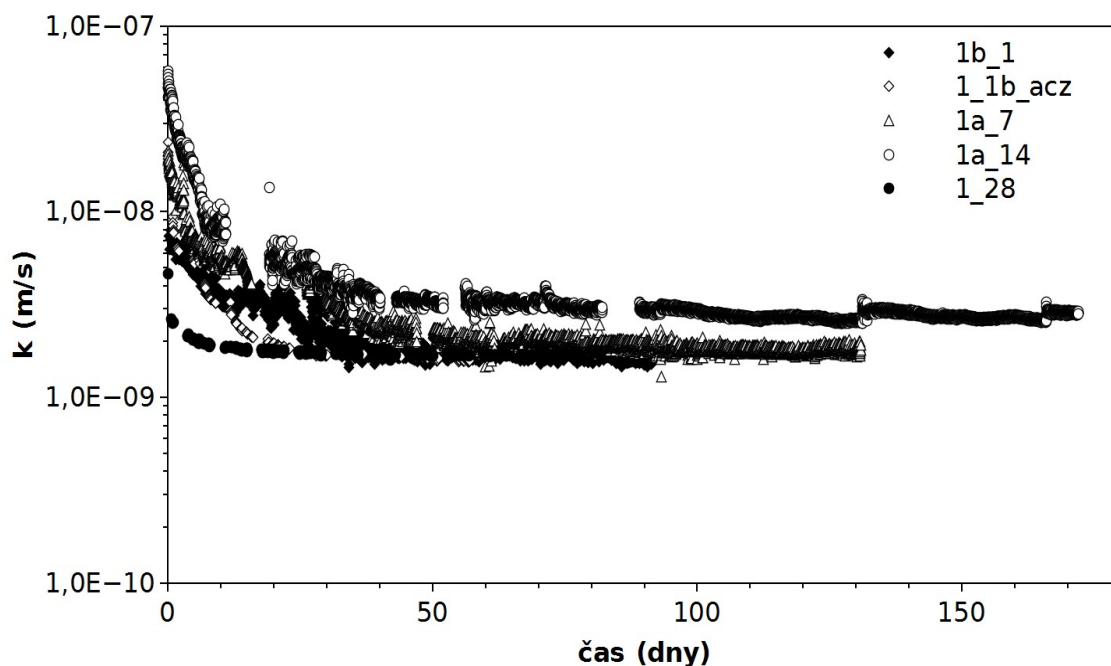
Označení vzorku	Před propustností				Po propustnosti			
	w	ρ_d	S	n	w	ρ_d	S	n
	(%)	(kg/m ³)	(-)	(%)	(%)	(kg/m ³)	(-)	(%)
1b_1uk	23,7	1567	0,94	39,7	26,8	1565	1	39,8
1_1b_acz	23,4	1585	0,95	39	26,1	1585	1	39
1a_7	22,3	1568	0,88	39,6	24,8	1572	0,99	39,5
1a_14	21,3	1565	0,84	39,8	25,4	1563	1	39,8
1_28	21,5	1603	0,9	38,3	25,9	1604	1	38,3

Hydraulickou vodivost vzorků upravených 1% CaO jsem měřila po dobu 78 – 172 dnů

(kapitola 10.2.1). Po ukončení zkoušky propustnosti jsem odebrala vzorky ze střední části těles 1a_7, 1a_14 a u těles 1b_1 a 1_28 navíc i z dolní a horní podstavy na analýzu MIP (kapitola 10.2.2).

10.2.1 Hydraulická vodivost zemin upravených 1% CaO

Na obrázku 10.4 je průběh hydraulické vodivosti během dlouhodobého propouštění vody pěti vzorky zeminy s 1% CaO po 1 (1_1b_acz, 1b_1_uk), 7 (1a_7), 14 (1a_14) a 28 (1_28) dnech zrání.

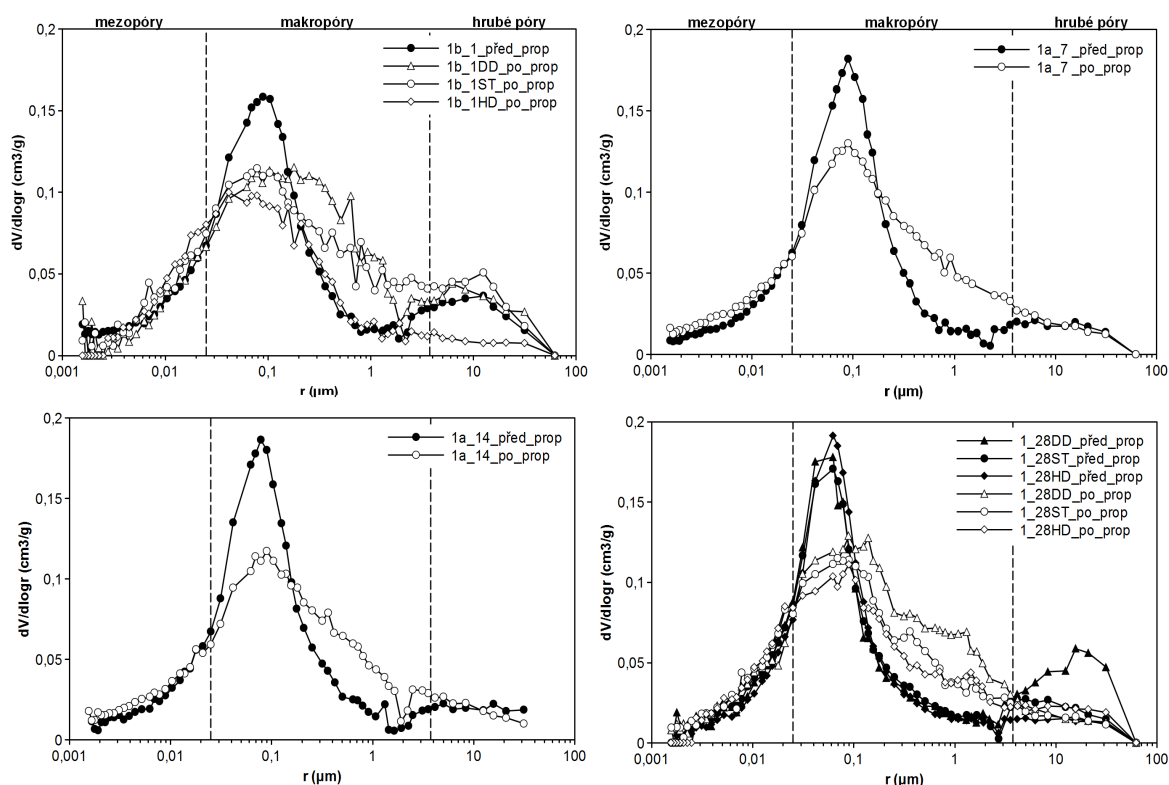


Obrázek 10.4 Vývoj hydraulické vodivosti zeminy s 1% CaO s rostoucí dobou propouštění.

Po 40-ti dnech propouštění zůstává hodnota hydraulické vodivosti s rostoucí dobou propouštění konstantní. Během prvních 40-ti dní propouštění hydraulická vodivost klesá k hodnotě $1 \cdot 10^{-9}$ m/s, avšak ji nedosáhne. Zkušební vzorky s 1% CaO jsou bez ohledu na dobu zrání propustnější než neupravená zemina (Obr. 10.1).

10.2.2 Výsledky rtuťové porozimetrie zemin upravených 1% CaO

Na obrázku 10.5 je zobrazeno porovnání distribuce pórů zeminy s 1% CaO před zkouškou propustnosti s distribucí pórů vzorků odebraných ze středu, popřípadě i z dolní a horní podstavy po 53 – 173 dnech propouštění.



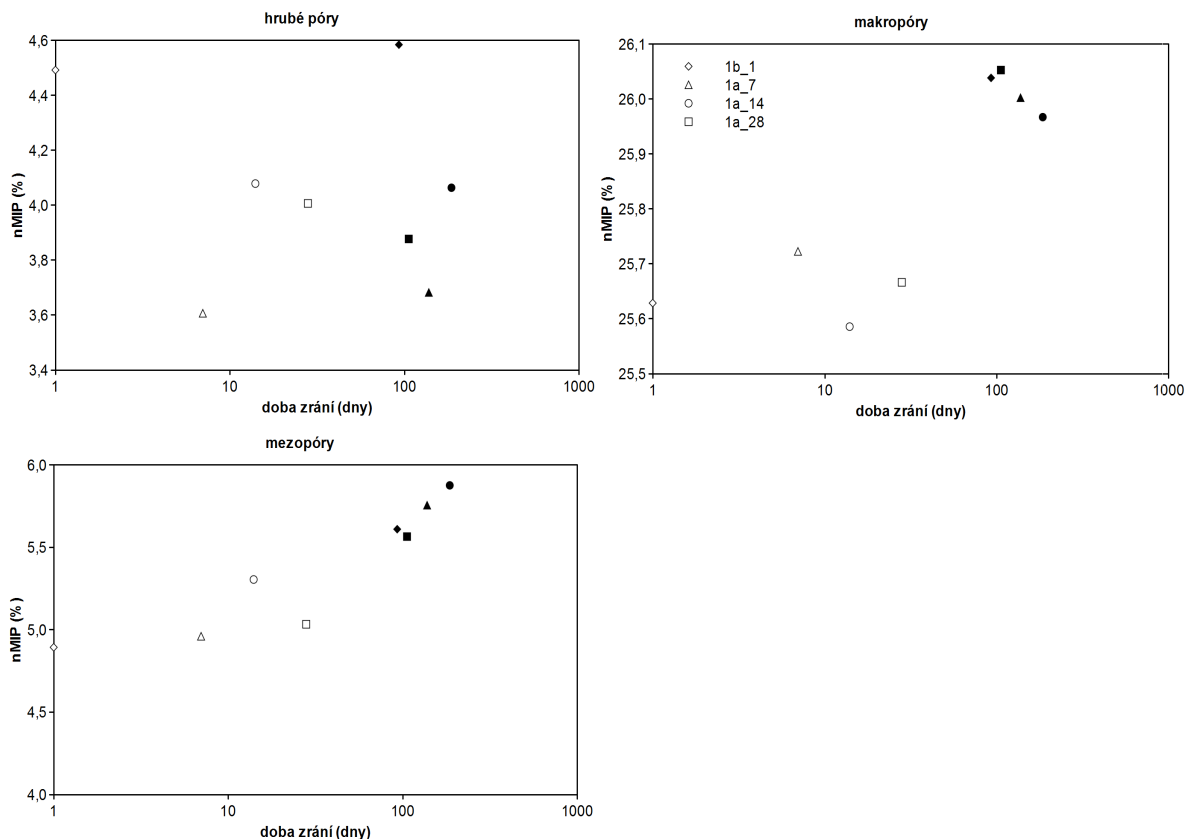
Obrázek 10.5 Distribuce pórů zeminy s 1% CaO po 1, 7, 14 a 28 dnech zrání před a po zkoušce propustnosti.

U všech vzorků zeminy upravené 1% CaO je patrná monodisperzní struktura pórů, která zůstává zachována i po propouštění. Distribuce mezopórů zůstává u všech vzorků po ukončení zkoušky propustnosti nezměněna. Naopak je tomu u makropórů. U všech vzorků klesá množství makropórů o poloměru mezi 0,04 a 0,14 μm a vzrůstá množství pórů o poloměru v rozmezí od 0,14 do 3,75 μm během dlouhodobého propouštění, a to nejvýrazněji u vzorků odebraných z dolní podstavy. Zastoupení hrubých pórů zůstává vlivem propouštění neměnné, což neplatí pro vzorek 1_28DD odebraný z dolní podstavy po propouštění, u nichž se zastoupení hrubých pórů snížilo.

r_{mode} frekvenčních křivek stanovené na vzorcích odebraných z jejich střední části se výrazně nemění vlivem propouštění, avšak klesá jejich objemové zastoupení v zemině (V_{mode}). Hodnota r_{mode} i V_{mode} frekvenčních křivek stanovená na vzorku 1b_1DD a 1_28DD odebraného z jeho dolní podstavy po propouštění je nepatrně vyšší než hodnoty r_{mode} a V_{mode} stanovené na vzorcích odebraných z horní podstavy nebo jejich střední části. Pro lepší vyhodnocení procesů, které probíhají během propouštění v zemině upravené 1% CaO, jsem graficky zobrazila změny pórovitosti n_{MIP} pro každou skupinu pórů před a po zkoušce propustnosti.

10.2.3 Statistické vyhodnocení výsledků MIP zemin upravených 1% CaO

Pro kvantifikaci vlivu doby propouštění na jednotlivé kategorie pórů jsem spočítala pórovitost mezopórů, makropórů a hrubých pórů vzorků odebraných ze střední části zkušebních těles před a po zkoušce propustnosti (Obr. 10.6).

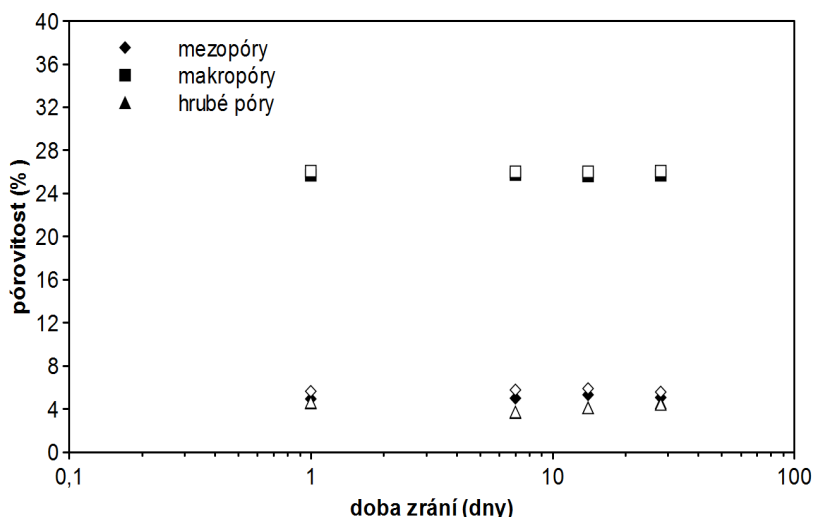


Obrázek 10.6 Porovnání pórovitostí mezopórů, makropórů a hrubých pórů zeminy s 1% CaO stanovené před zahájením (prázdné znaky) a po ukončení zkoušky propustnosti (plné znaky).

Pórovitosti mezopórů, makropórů a hrubých pórů stanovené před zahájením zkoušky propustnosti jsem přiřadila dobu zrání, kterou vzorky zrály v exikátoru. Pórovitosti mezopórů, makropórů a hrubých pórů stanovené po ukončení zkoušky propustnosti jsem přiřadila součet doby zrání, kterou vzorky zrály v exikátoru, a doby trvání zkoušky.

U sledovaných vzorků nebyla pozorována významná změna pórovitosti makropórů, mezopórů ani hrubých pórů s rostoucí dobou zrání (prázdné znaky). Po ukončení zkoušky propustnosti sice vzrostla pórovitost makropórů i mezopórů, ale tento nárůst je velmi malý a blízký přesnosti metody MIP ($\pm 0,5\%$). Le Runigo et al. (2009, Obr. 4.14) také zaznamenali u prachovité zeminy s 1% CaO hutněné při vlhkosti OMV energií NE a po 25 dnech zrání změny v oblasti makropórů po 150 dnech propuštění. Tyto pórové změny porovnali s distribucí pórů vzorku, který byl zcela nasycen po 7 dnech sycení ve vodě. Autoři na základě

porovnání těchto distribucí pórů přičítají změnu pórového prostoru syčení vzorku než vlivu působení proudící vody. Dále LeRunigo et al. (2009) z porovnání chemických a mineralogických analýz provedených na vzorku zeminy s 1% CaO po 1, 6 a 25 dnech zrání a po 25 dnech zrání a 150 dnech propouštění usoudili, že obsah novotvořených fází se nemění u vzorku ani s dobou zrání ani vlivem zkoušky propustnosti. Na základě této studie jsem na obrázku 10.7 porovнала pórovitosti n_{MIP} mezopórů, makropórů a hrubých pórů u zeminy s 1% CaO před a po zkoušce propustnosti.



Obrázek 10.7 Pórovitosti mezopórů, makropórů a hrubých pórů u zeminy s 1% CaO různé doby stáří stanovená rtuťovou porozimetrií před (plné znaky) a po zkoušce propustnosti (prázdné znaky).

Pórovitost jednotlivých pórů detekovaných metodou MIP se nemění během zkoušky propustnosti bez ohledu na stáří vzorků a rozdílnou dobu propouštění.

10.3 Zeminy upravené 8% CaO

Vzorky upravené 8% CaO jsem ručně vyřezala po 1, 7, 14, 28 a 120 dnech zrání z hutněných těles, jejichž vlhkost a suchá objemová hmotnost je uvedena v tabulce 10.6.

Tabulka 10.6 Vlhkosti a suché objemové hmotnosti hutněných vzorků stanovených po hutnění.

Označení vzorku	w (%)	ρ_d (kg/m ³)
8b_1	30,4	1430
8a_7	28,7	1450
8a_14	27,8	1445
8a_28	26,1	1445
8a_120	26,5	1450

Zkušební vzorky měly průměr kolem 35 mm a výšku kolem 38 mm, jen vzorek 8a_120 měl průměr 50 mm a výšku kolem 38 mm. Během vyřezávání vzorků jsem ze střední části tělesa odebrala vzorek pro analýzu MIP. Vzorky jsem zvažila, změřila a osadila je do propustoměru. Fyzikální parametry vzorků s 8% CaO vypočtené před a po zkoušce propustnosti jsou uvedeny v tabulce 10.7).

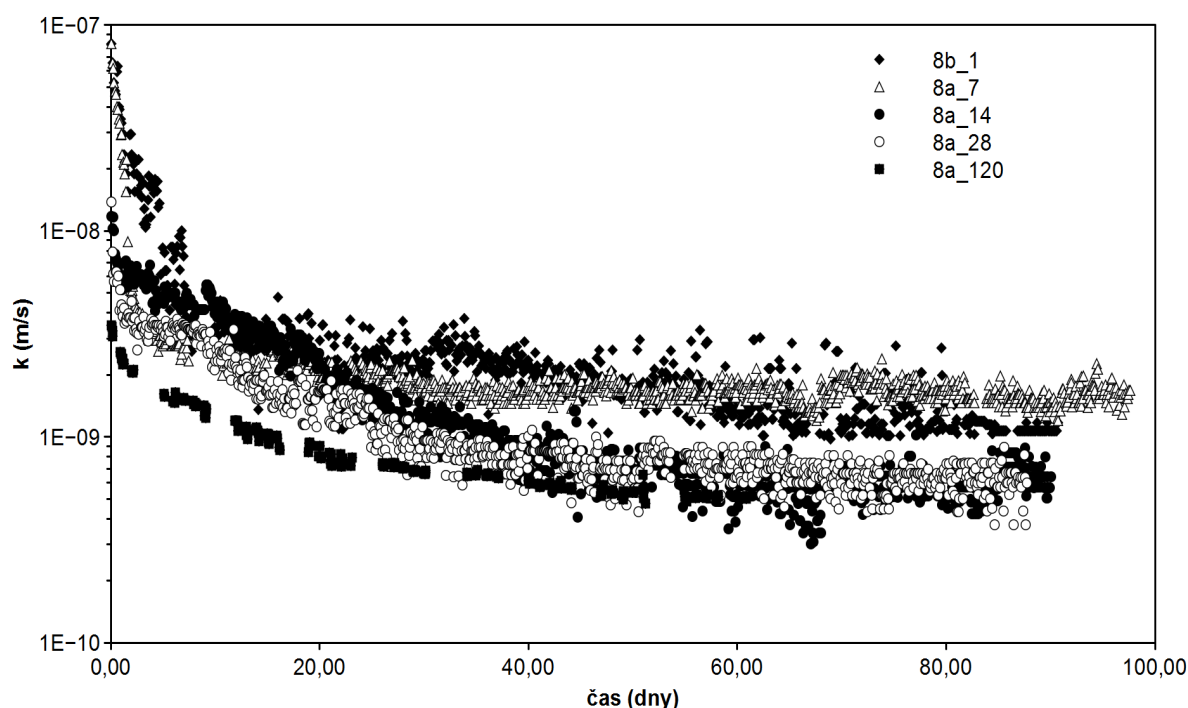
Tabulka 10.7 Fyzikální parametry zeminy s 8% CaO po 1, 7, 14, 28 a 120 dnech zrání spočtené před a po zkoušce propustnosti.

	Před propustností				Po propustnosti			
	w	ρ_d	S	n	w	ρ_d	S	n
	(%)	(kg/m ³)	(-)	(%)	(%)	(kg/m ³)	(-)	(%)
8b_1	30,6	1426	96,8	45,2	31,2	1431	99,3	45
8a_7	28,6	1453	95,7	43,7	30,1	1453	99,2	44,1
8a_14	28	1453	92,1	44,1	30,9	1453	1	44,1
8a_28	26,1	1454	86,2	44,1	30,1	1452	99	44,1
8a_120	28,4	1448	93	44,3	30,8	1448	1	44,3

Hydraulickou vodivost vzorků upravených 8% CaO jsem měřila po dobu 61 – 98 dnů (kapitola 10.3.1). Po ukončení zkoušky propustnosti jsem odebrala vzorky ze střední části těles 8b_1, 8a_7, 8a_14 a 8a_28 a u tělesa 8a_120 navíc i z dolní a horní podstavu na analýzu MIP (kapitola 10.3.2).

10.3.1 Hydraulická vodivost zemin upravených 8% CaO

Na obrázku 10.8 je zobrazen průběh hydraulické vodivosti během dlouhodobého propouštění vody pěti vzorky zeminy s 1% CaO po 1 (8_1b), 7 (8a_7), 14 (8a_14), 28 (8a_28) a 120 (8a_120) dnech zrání.



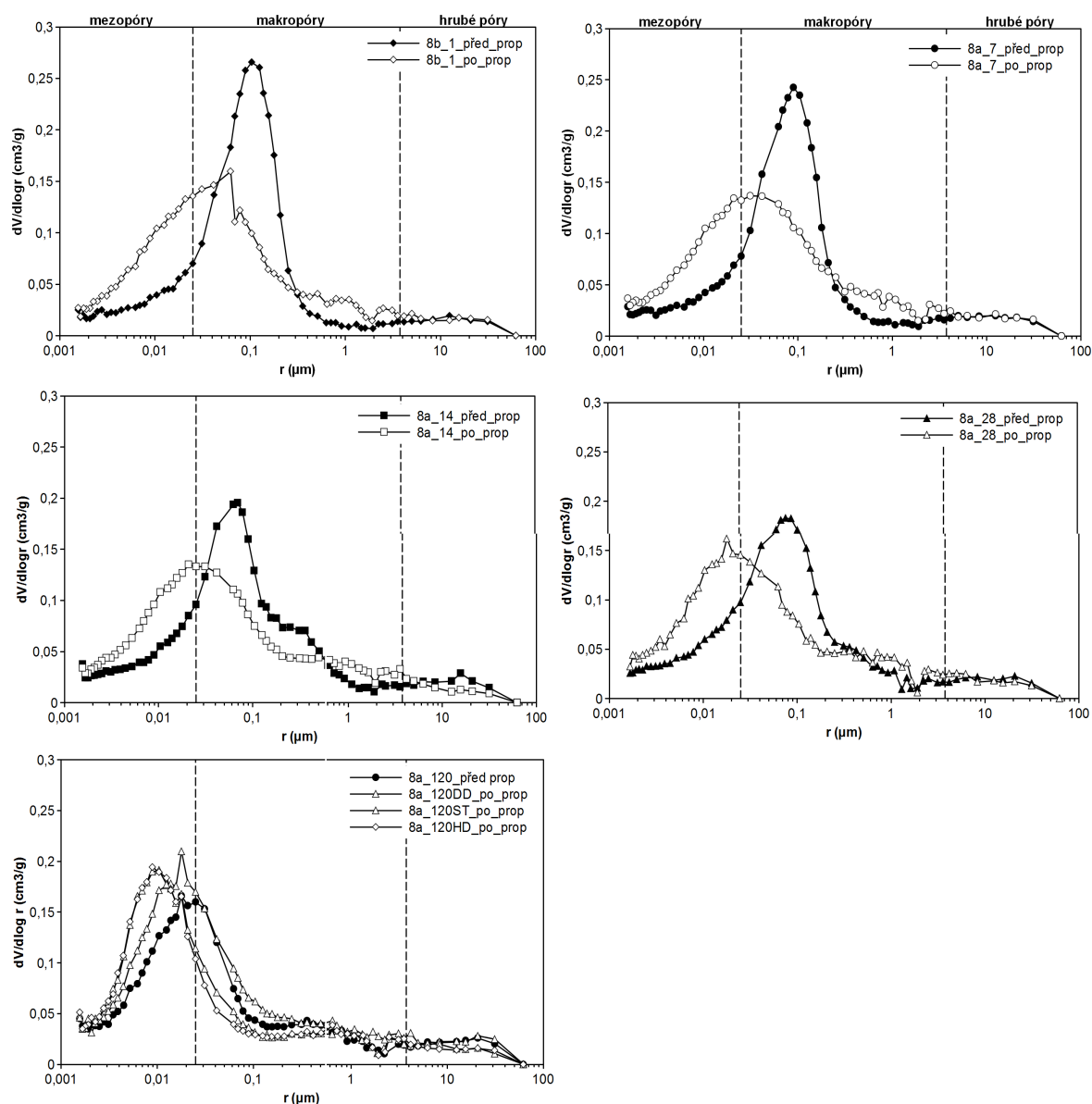
Obrázek 10.8 Vývoj hydraulické vodivosti zeminy s 8% s rostoucí dobou propouštění.

Po 40-ti dnech propouštění zůstává hodnota hydraulické vodivosti s rostoucí dobou propouštění konstantní. Během prvních 40-ti dní propouštění hydraulická vodivost klesá k hodnotě $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, avšak pouze vzorky 8a_14, 8a_28 a 8a_120 tuto hodnotu překročí a dosahují velmi blízkých hodnot hydraulické vodivosti neupravené zeminy (Obr. 10.1).

10.3.2 Výsledky rtuťové porozimetrie zemin upravených 8% CaO

Na obrázku 10.9 je zobrazeno porovnání distribuce pórů zeminy s 8% CaO před zkouškou propustnosti s distribucí pórů vzorků odebraných ze středu, popřípadě i z dolní a horní podstavy po 61 – 98 dnech propouštění.

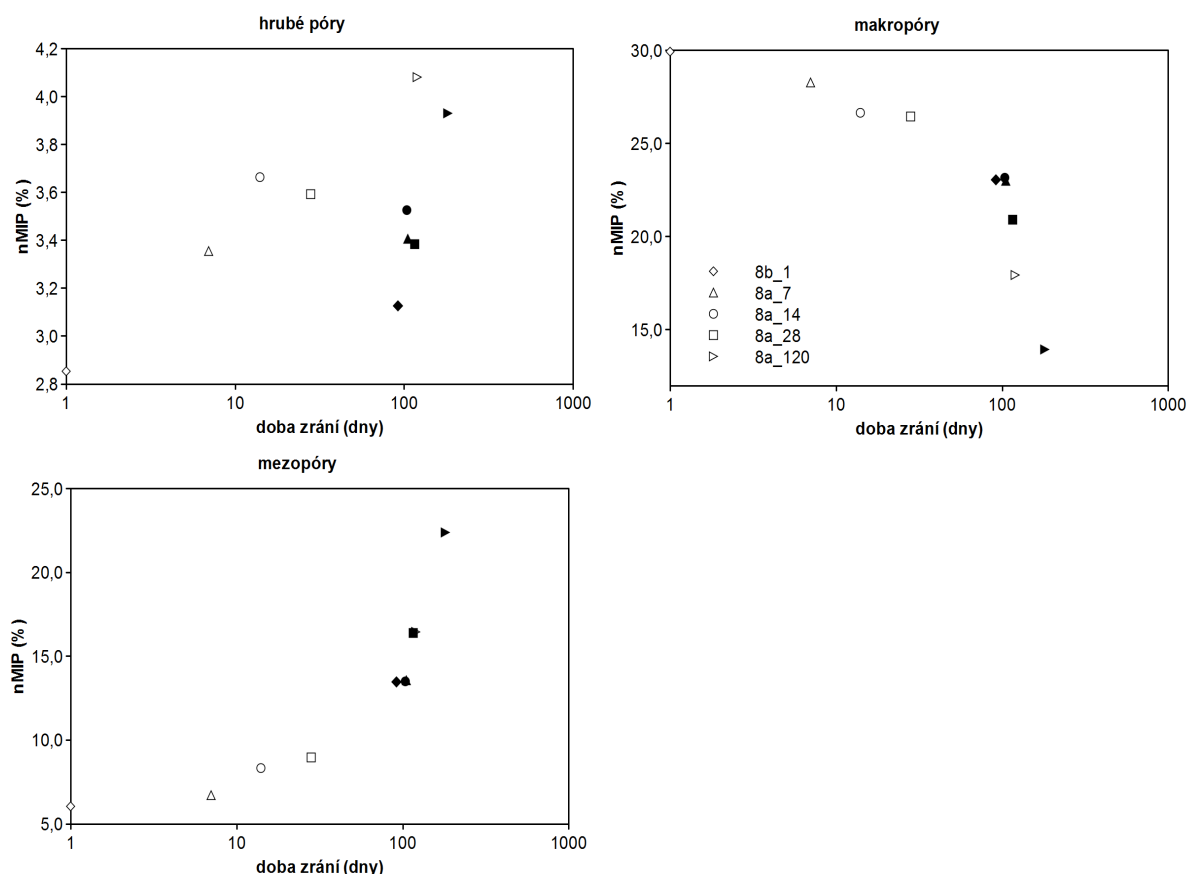
U všech vzorků zeminy upravené 8% CaO je patrná monodisperzní struktura pórů, která zůstává zachována i po propouštění. Na rozdíl od zemin upravených 1% CaO narůstá objemové zastoupení mezopórů a klesá objem makropórů u všech vzorků během zkoušky propustnosti. Naopak objem hrubých pórů zůstává nezměněn. Pro lepší vyhodnocení procesů, které probíhají během propouštění v zemině upravené 8% CaO, jsem graficky zobrazila změny pórovitosti n_{MIP} pro každou skupinu pórů před a po zkoušce propustnosti.



Obrázek 10.9 Distribuce pórů zeminy s 8% CaO po 1, 7, 14, 28 a 120 dnech zrání stanovená před a po zkoušce propustnosti.

10.3.3 Statistické vyhodnocení výsledků MIP zemin upravených 8% CaO

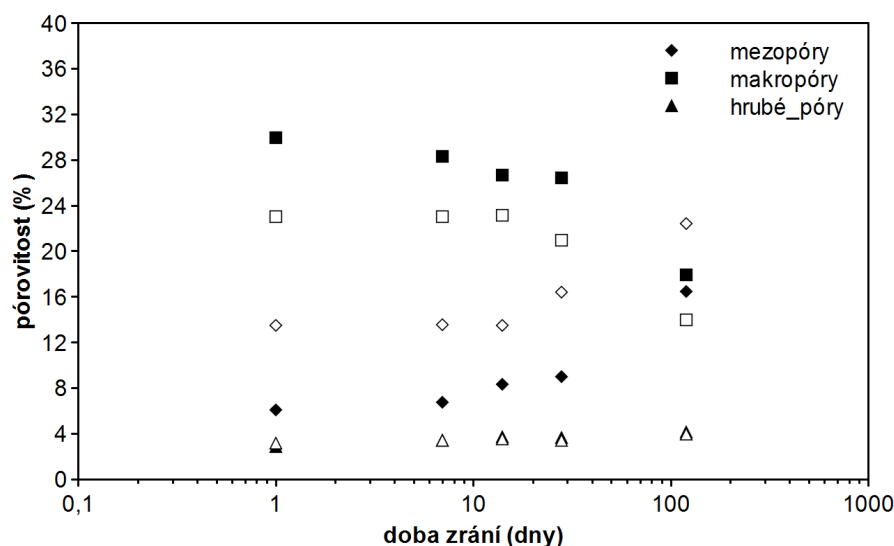
Pro kvantifikaci vlivu doby propouštění na jednotlivé kategorie pórů jsem spočítala pórovitost mezopórů, makropórů a hrubých pórů vzorků odebraných ze střední části zkušebních těles před a po zkoušce propustnosti (Obr. 10.10). Pórovitosti mezopórů, makropórů a hrubých pórů stanovené před zahájením zkoušky propustnosti jsem přiřadila dobu zrání, kterou vzorky zrály v exikátoru. Pórovitosti mezopórů, makropórů a hrubých pórů stanovené po ukončení zkoušky propustnosti jsem přiřadila součet doby zrání, kterou vzorky zrály v exikátoru, a doby trvání zkoušky.



Obrázek 10.10 Porovnání pórovitostí mezopórů, makropórů a hrubých pórů zeminy s 8% CaO stanovené před zahájením (prázdné znaky) a po ukončení zkoušky propustnosti (plné znaky).

U sledovaných vzorků lze vidět významný nárůst pórovitosti mezopórů a pokles pórovitosti makropórů s rostoucí dobou zrání (prázdné znaky). Na základě výsledků z kapitoly 9 přisuzuji tyto změny pórovitosti růstu novotvořených minerálních fází. Pórovitost hrubých pórů také roste s rostoucí dobou zrání (prázdné znaky), avšak tyto změny jsou v rozmezí 1%, což spíše přičítám variabilitě jednotlivých vzorků.

Po zkoušce propustnosti jsem nepozorovala významnou změnu pórovitosti hrubých pórů. Naopak pórovitost makropórů klesla a pórovitost mezopórů vzrostla během propouštění. Le Runigo et al. (2009, Obr. 4.14) také zaznamenali u prachovité zeminy s 3% CaO hutnější při vlhkosti OMV energií NE a po 25 dnech zrání nárůst pórů o poloměru pod $0,05\ \mu\text{m}$ po 150 dnech propuštění. Na základě chemických a mineralogických analýz provedených na vzorku zeminy s 3% CaO po 1, 6 a 25 dnech zrání a po 25 dnech zrání a 150 dnech propuštění autoři prokázali, že se během propouštění vytváří nové minerální fáze. Na základě této studie jsem na obrázku 10.11 porovnála pórovitosti n_{MIP} mezopórů, makropórů a hrubých pórů u zeminy s 8% CaO před a po zkoušce propustnosti.



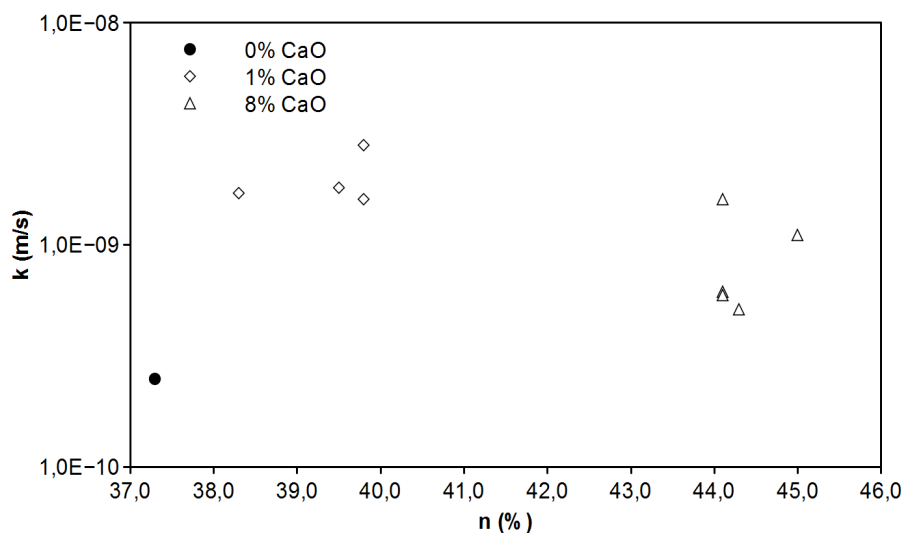
Obrázek 10.11 Pórovitosti mezopórů, makropórů a hrubých pórů u zeminy s 8% CaO různé doby stáří stanovená rtuťovou porozimetrií před (plné znaky) a po zkoušce propustnosti (prázdné znaky).

Pórovitost hrubých pórů se během propouštění nemění. Naopak pórovitost makropórů se klesla a pórovitost mezopórů vzrostla během propouštění. Na základě výsledků Le Runiga et al. (2009) přisuzují pokles pórovitosti makropórů na úkor pórovitosti mezopórů tvorbě novotvořených fází i pod hladinou vody.

10.4 Vliv změny pórovitosti na hydraulickou vodivost

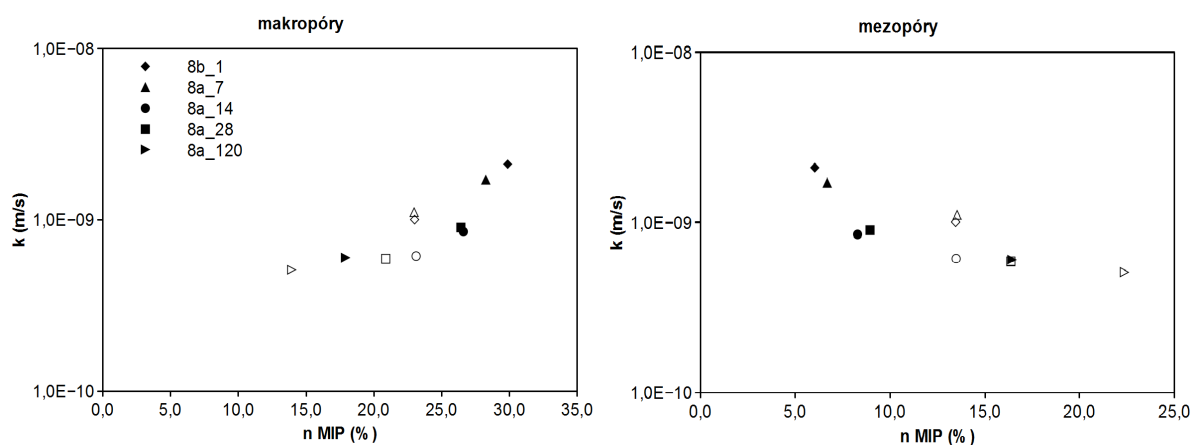
Závislost pórovitosti zeminy s 0%, 1% a 8% CaO (n) stanovené po zkoušce propustnosti na hydraulické vodivosti, kterou zemina dosáhla na konci zkoušky propustnosti je zobrazena na obrázku 10.12. Vzorek 0a_1 zde není uveden, protože jsem ho manipulací během zkoušky propustnosti porušila.

Hydraulická vodivost by měla růst s rostoucí pórovitostí zeminy (Terzaghi, 1925). Tento trend však nesplňují zeminy upravené 8% CaO. I když mají pórovitost o zhruba 5% vyšší než zeminy upravené 1% CaO, tak dosahují stejné nebo nižší hodnoty hydraulické vodivosti. Pórovitost zeminy s 8% CaO se nemění během zkoušky propustnosti.



Obrázek 10.12 Závislost hydraulické vodivosti na pórovitosti zeminy s 0%, 1% a 8% CaO stanovené po zkoušce propustnosti

Hodnotu hydraulické vodivosti vzorků s 8% CaO mohla spíše ovlivnit změna distribuce pórů o poloměru pod $3,75\ \mu\text{m}$. Proto jsem zobrazila závislost hydraulické vodivosti zeminy s 8% CaO na pórovitosti mezopórů a makropórů (Obr. 10.13).

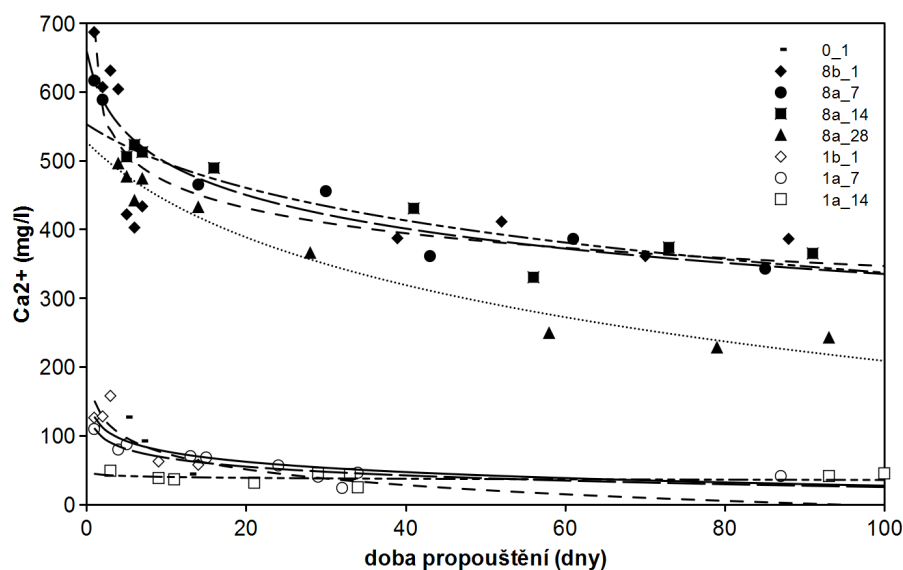


Obrázek 10.13 Závislost hydraulické vodivosti stanovené po 40 dnech propouštění (plné znaky) a poslední den propouštění (prázdné znaky) na pórovitosti makropórů a mezopórů.

K pórovitosti makropórů a mezopórů stanovené po 1 – 120 dnech zrání zkoumaných vzorků jsem přiřadila hodnotu hydraulické vodivosti stanovené po 40 dnech propuštění a k pórovitosti makropórů a mezopórů stanovené po zkoušce propustnosti jsem přiřadila hodnotu hydraulické vodivosti stanovené poslední den propouštění. Hydraulická vodivost klesá s rostoucí pórovitostí mezopórů a klesající pórovitostí makropórů.

10.5 Obsah Ca^{2+}

Na obrázku 10.14 je zobrazen pokles Ca^{2+} iontů z výluhu, který byl odebíráán po protečení vzorkem s 0%, 1% a 8% CaO po různých dobách propouštění.



Obrázek 10.14 Stanovení obsahu iontů Ca^{2+} ve výluhu odebraného po různé době propouštění.

Obsah vápenatých iontů ve výluhu ze vzorků 1b_1 a 1a_7 se mění prvních 20 dní propouštění a ustaluje se na hodnotě cca 50 mg/l. Stejný průběh má i neupravená zemina. U vzorku 1a_14 je obsah vápenatých iontů na počátku zkoušky propustnosti kolem 50 mg/l a zůstává neměnný.

Obsah vápenatých iontů v zemině s 8% CaO je mnohonásobně vyšší, okolo 600 mg/l. U vzorků 8b_1, 8a_7 a 8a_14 k výraznému poklesu Ca^{2+} ve výluhu dochází během prvních 20 dní a dále se snižuje s dobou propouštění. Po 90 dnech propouštění byl obsah vápenatých iontů kolem 400 mg/l. U vzorku 8a_28 je počáteční obsah vápenatých iontů nižší, než u mladších vzorků, kolem 500 mg/l a po 90 dnech propouštění dosahuje hodnot kolem 250 mg/l.

10.6 Shrnutí

Vývoj hydraulické vodivosti jsem dlouhodobě sledovala na neupravené studované zemině a na směsi zeminy upravené 1% a 8% CaO po různé době zrání.

Hydraulická vodivost nevápněné zeminy klesá během prvních 40-ti dní propouštění a dosahuje po zhruba 100 dnech propouštění hodnoty $k \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$.

Hydraulická vodivost u studované zeminy upravené 1% CaO byla stanovena po 1, 7, 14 a

28 dnech zrání. Hydraulická vodivost všech zkoušených vzorků klesla během prvních 40-ti dní propouštění k hodnotě $1 \cdot 10^{-9}$ m/s, ale i po dlouhodobém propouštění zůstala upravená zemina propustnější než neupravená zemina. Zkouška propustnosti neměla vliv na změnu distribuce mezopórů ani nedošlo k větším změnám distribuce hrubých pórů. V důsledku sycení vzorku došlo pouze k redistribuci makropórů avšak bez většího vlivu na její hodnotu pórovitosti n_{MIP} . Pórovitost mezopórů, makropórů a hrubých pórů detekovaných metodou MIP se nemění během zkoušky propustnosti bez ohledu na stáří vzorků a rozdílnou dobu propouštění.

Hydraulická vodivost u studované zeminy upravené 8% CaO byla stanovena po 1, 7, 14, 28 a 120 dnech zrání. Hydraulická vodivost všech zkoušených vzorků klesla během prvních 40-ti dní propouštění k hodnotě $1 \cdot 10^{-9}$ m/s, avšak pouze vzorky zrající 14, 28 nebo 120 dní před zkouškou propustnosti tuto hodnotu překročily a dosáhly velmi blízkých hodnot hydraulické vodivosti neupravené zeminy. Pórovitost hrubých pórů se nemění během zkoušky propustnosti. Avšak hydraulická vodivost klesá s rostoucí pórovitostí mezopórů a s klesající pórovitostí makropórů. Nárůst pórovitosti mezopórů na úkor pórovitosti makropórů je pravděpodobně způsoben tvorbou novotvořených minerálních fází i pod hladinou vody.

Výluh ze vzorků upravených 1% CaO bez ohledu na jejich stáří obsahuje stejné množství vápenatých iontů jako výluh z neupravené zeminy a jejich obsah ve výluhu se ustaluje po 20 dnech propouštění. Obsah vápenatých iontů ve výluhu ze zeminy s 8% CaO bez ohledu na jejich stáří je 12x větší než u neupravené zeminy a jejich pokles ve výluhu byl detekovaný i po 90 dnech propouštění.

11. Diskuze

Vápno přidané do zeminy způsobuje flokulaci jílovitých částic, která má za následek nárůst pórovitosti. Výsledkem je vyšší hodnota hydraulické vodivosti než měla zemina před úpravou. Avšak novotvořené minerální fáze, jejichž vznik se očekává u směsi zeminy po přidání optimálního množství vápna nebo vyšší, by mohly s rostoucí dobou zrání zaplňovat pórový prostor zeminy, což by mohlo mít dopad na snížení hydraulické vodivosti upravené zeminy.

11.1 Porovnání metod stanovení optimálního množství vápna

Pro stanovení optimálního množství vápna studované zeminy jsem použila 4 metody, které byly doporučeny v literatuře. Hilt a Davidson (1960) ve své práci publikovali rovnici (3.2), která pro výpočet OMV využívá pouze znalosti procentuálního zastoupení jílových částic o velikosti pod 0,002 mm. Na jejím základě bylo OMV studované zeminy stanoveno na 1,8% CaO. Vzhledem k tomu, že rovnice nezvažuje mineralogické a chemické složení zeminy, brala jsem tuto hodnotu jako rychlé a orientační stanovení OMV. Na nedostatky rovnice upozorňují i Metelková et al. (2014), kteří využili tuto rovnici pro stanovení OMV jílu s velmi vysokou plasticitou s obsahem uhelné složky z lokality Třebovice ($w_L = 83\%$, $I_p = 30,6\%$, 60% částic o velikosti 0,002 mm), kde obsah organických látek měl významný vliv na nesprávné stanovení OMV. Proto stanovení OMV pomocí rovnice (3.2) doporučuji ověřit pH testem.

Rovněž stanovení OMV ze závislosti I_p (Eades a Grim, 1966) nebo w_p (Hilt a Davidson, 1960) na množství vápna je spíše doplňkovou metodou k pH testu. Hilt a Davidson (1960) doporučují stanovit w_p na směsích po 48 hodinách zrání, avšak Sotorník (2011) ve své práci upozornil, že po 2 dnech zrání nebylo možno u směsi zkoumané zeminy s obsahem vápna nad 2% stanovit w_p bez dalšího přidání vody, čímž se však změnil normový postup. To je pravděpodobně důvod, proč hodnota OMV studované zeminy byla stanovena o necelé 1% nižší než OMV stanovené pH testem. Již Rogers et al. (1997) doporučili stanovit w_p směsi

zeminy s vápnem po šesti hodinách zrání, kdy předpokládají ukončení flokulace jílových částic. Metelková et al. (2014) potvrdili, že hodnoty OMV stanovené ze závislosti w_p na množství vápna po 48 hodinách zrání a po 6 hodinách zrání na čtyřech různých zeminách jsou identické nebo velmi podobné. Proto doporučení Rogerse et al. (1997) podporuji. Eades a Grim (1966) doporučují stanovit I_p na směsích po 1 hodině zrání, ale na základě výsledků Sotorníka (2011) a zkušeností Metelkové et al. (2014) navrhuji hodnotu OMV nestanovovat z grafické závislosti I_p na množství vápna, ale vyhodnotit zpracovatelnost směsi zeminy s vápnem během stanovení konzistenčních mezí.

11.2 Rtut'ová porozimetrie

Pro analýzu změn pórového prostoru jsem vybrala rtuťovou porozimetrii, která se v literatuře hojně používá, i když reálně nepopisuje pórový prostor zeminy, ale využívá zjednodušených modelových představ přímých válcových pórů s kruhovým průřezem. Metodu jsem považovala za dostačující pro identifikaci pórů, které by měly ovlivnit hydraulickou vodivost zeminy. Pro hrubou představu lze velikost molekuly vody velmi hrubě odhadnout, pokud víme, že 18 cm³ vody (18 gramů) obsahuje $6 \cdot 10^{23}$ molekul. Na jednu molekulu tak připadá objem $30 \cdot 10^{-30}$ m³, tj. krychlička o hraně přibližně 0,0003 μm. Pokud jsou póry měřitelné rtuťovou porozimetrii, měly by být přístupné i pro molekuly vody, ale otázkou zůstalo, jakou měrou se podílejí na výsledné hodnotě hydraulické vodivosti.

Před MIP analýzou byl vzorek sušen pomocí lyofilizace se sublimací. Na některých vybraných vzorcích byla standardně stanovená vlhkost vzorku (ČSN CEN ISO/TS 17892-1, 2005) porovnána s hodnotou spočtenou z údajů hmotnosti vzorku před a po sušení v lyofilizátoru. Ze zanedbatelného rozdílu mezi vlhkostmi jsem usoudila, že zvolený typ sušení vzorku je zcela dostačující.

Distribuce pórového prostoru zeminy bez přídavku vápna byla porovnána s distribucí pórů zeminy, kterou publikovali Le Runigo et al. (2009) a Cusinier et al. (2011). U všech zemin byl detekován monodisperzní tvar křivky, které se však vzájemně lišily hodnotou poloměru nejčteněji zastoupených pórů. Le Runigo et al. (2009) zaznamenali u neupravené zeminy o 0,4 μm a Cusinier et al. (2011) dokonce o 0,7 μm vyšší poloměr nejčteněji zastoupených pórů na rozdíl od mých výsledků. Tyto rozdíly mohly být způsobeny nejen odlišným zrnitostním složením studovaných zemin, ale i odlišným způsobem přípravy vzorků. Bohužel zmíněné práce neuvádějí zrnitostní křivku zeminy, ale pouze obsah částic o velikosti pod 0,002 mm a Cusinier et al. (2011) navíc ještě obsah částic o velikosti pod 0,08 mm. I když autory uvedený obsah částic spolu s hodnotami konzistenčních mezí jsou velmi

podobné stanoveným hodnotám zkoumané zeminy, nelze zcela vyloučit odlišné pórovitosti připravených vzorků. Na základě znalosti zdánlivé hustoty pevných částic, suché objemové hmotnosti, vlhkosti vzorku a objemu formy, do které autoři vzorek hutnili, jsem orientačně stanovila pórovitost, kterou jsem porovnála s vypočtenou pórovitostí neupraveného jílovitého siltu. Nejnižší hodnoty pórovitosti 34% dosáhla neupravená studovaná zemina. Vzorek připravený Le Runigem et al. (2009) měl pórovitost cca 34,6% a vzorek připravený Cusinierem et al. (2011) měl pórovitost cca 35,8%. Rozdíly v pórovitosti by mohly být důvodem v rozdílnosti poloměru nejčteněji zastoupených pórů.

Vlivem přidání 1% CaO do zkoumané zeminy ($w_L = 35\%$, $I_p = 17\%$) klesla maximální suchá objemová hmotnost (PS) o 98 kg/m^3 , což přisuzuji nárůstu objemu pórů o poloměru $0,025 - 0,35 \text{ }\mu\text{m}$. Le Runigo et al. (2009) také zaznamenali pokles maximální suché objemové hmotnosti o 97 kg/m^3 vlivem přidání 1% CaO do prachovité zeminy ($w_L = 37\%$, $I_p = 18,3\%$), což však přisuzují významnému nárůstu objemu pórů o poloměru $0,01 - 0,2 \text{ }\mu\text{m}$. Cusinier et al. (2011) u prachovité zeminy ($w_L = 32,5\%$, $I_p = 12,7\%$) také po přidání 3% CaO pozorovali nárůstu objemu pórů o poloměru $0,01 - 0,2 \text{ }\mu\text{m}$, i když zeminu hutnili odlišným způsobem. Rozdílně stanovený interval poloměru pórů, jejichž objem vzrostl po přidání vápna, by mohl být způsoben různým typem jílových částic zastoupených v zemině. Le Runigo et al. (2009) pracovali se zeminou se značným podílem smíšené struktury illit - smektit a Cusinier et al. (2011) se zeminou se značným zastoupením kaolinitu. U těchto jílových minerálů lze předpokládat spíše sorpci iontů do mezivrstev během flokulace než u illitu, kde se ionty spíše vážou na jeho povrch a lze tedy očekávat intenzivnější flokulaci. Proto je tvar křivky pórového prostoru studované vápněné zeminy spíše podobný tvaru křivky, který Locat et al. (1996) zaznamenali u vápněné zeminy s převahou illitu a chloritu. Změnu pórového prostoru jsem sledovala i dlouhodobě na zemině s 1% a 2% CaO během 360 dní zrání, u které nebyla pozorována změna pórovitosti n_{MIP} , a dále s 1,5 až 3 násobkem optimálního množství vápna, u které klesla po 540 dnech zrání pórovitost n_{MIP} o 0,7%, respektive o 2,5%. Dlouhodobou studii změny pórového prostoru vlivem vápna provedli pouze Choquette et al. (1987) na čtyřech různých typech jílu s 4% CaO, nepozorovali však pokles pórovitosti n_{MIP} ani po 300 dnech zrání, ale pouze redistribuci makropórů vlivem tvorby novotvořených fází. Na základě výsledků skenovacího elektronového mikroskopu minerální fáze přepaží póry, což vede ke zmenšení jejich poloměru bez změny celkového objemu pórů. Tento jev však Choquette et al. (1987) popsali na vzorku s 4% vápna až po 100 dnech zrání. Na základě poklesu r_{mode} bez dalších významných změn V_{mode} tento jev předpokládám již po 56 dnech zrání u zeminy s 4% a 8% CaO.

Změna distribuce pórů s rostoucí dobou zrání byla způsobena tvorbou nových minerálních fází ve formě CAH a CASH, jejichž výskyt jsem ověřila pouze u zeminy s 8% CaO, kde byla velká pravděpodobnost jejich detekce vzhledem k vysokému množství použitého vápna. U nižšího obsahu vápna jsem se pokusila na skenovacím elektronovém mikroskopu značky TESCAN Vega na Ústavu petrologie a strukturní geologie Univerzity Karlovy v Praze detekovat novotvořené fáze, ale bohužel bez úspěchu. Proto jsem výsledné snímky do této práce nezahrnula. Avšak v případě zeminy s 1% CaO po 1, 7, 14 a 28 dnech zrání Metelková et al. (2010) detekovali kumulativní objem pórů, který vypočetli z desorpční izotermy metodou BJH (Barret et al., 1951). Touto metodou zaznamenali pokles průměrné hodnoty poloměru pórů vypočtenou z intervalu pórů o poloměru 0,001 – 0,15 μm z hodnoty 5,53 nm na 3,12 nm s rostoucí dobou zrání. Pokles poloměru pórů r_{mode} během prvních 28 dní zrání byl potvrzen i výsledky rtuťové porozimetrie a přičítám ho spíše tvorbě portlanditu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a kalcitu (CaCO_3) než tvorbě novotvořených fází, protože 1% CaO je výrazně pod stanovenou hodnotou optimálního množství vápna. Přítomnost portlanditu předpokládám u všech směsí, protože vzniká hydratací páleného vápna. Karbonatací portlanditu vzniká kalcit, což je produkt tohoto doprovodného jevu úpravy zeminy vápnem. Ale výskyt portlanditu ani kalcitu nemám bohužel potvrzen přímou metodou.

U zeminy s 4% CaO pouze na základě vývoje pórového prostoru s rostoucí dobou zrání, který má však velmi podobný trend jako u zeminy s 8% CaO, usuzuji, že změna distribuce pórů s rostoucí dobou zrání je také vyvolána tvorbou novotvořených fází. U zeminy s 2% CaO lze také prvních 120 dní zrání pozorovat změnu distribuce pórů, i když toto množství vápna je pod stanovenou hodnotou optimálního množství vápna 2,85%. Pokud bych však optimální množství vápna stanovila podle Rogerse et al. (1997) jako inflexní bod ke křivce závislosti pH na rostoucím množství vápna po 1 hodině zrání, pak by i 1,7% vápna mělo být dostačující pro vznik pucolánových reakcí, což dokazuje i statistické vyhodnocení pórovitosti mezopórů a makropórů. Změny distribuce pórů jsem detekovala nad hodnotu pH kolem 11,7. Podle Eadese a Grima (1966) rostla pevnost směsi jílu o nízké plasticitě s příměsí 2 – 8% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s rostoucí dobou zrání, dokud pH směsi nekleslo pod hodnotu 11. Autoři však vzorky nechali zrát při teplotě 60°C a zvyšující se teplota má vliv na snížení hodnoty pH.

11.3 Hydraulická vodivost

Zkouška propustnosti probíhala vápnem na upravených i neupravených zeminách při hydraulickém gradientu 30 a sytícím tlaku 300 kPa. Tyto parametry jsem zvolila na základě práce Metelková a Boháč (2008), které použili na stanovení hydraulické vodivosti

minerálního těsnění, kde efektivní napětí bylo okolo 15 kPa.

Neupravený vzorek jsem podrobila zkoušce propustnosti. Pokles hydraulické vodivosti neupraveného vzorku jsem sledovala po celou dobu zkoušky propustnosti. Pomocí rtuťové porozimetrie jsem před zkouškou propustnosti neupraveného vzorku detekovala monodisperzní distribuci pórů, kde byly nejčastěji zastoupeny póry o poloměru v rozmezí 0,1 – 1 μm a navíc bylo detekováno zvýšené zastoupení pórů o poloměru 0,01 – 0,1 μm , které však nezaznamenal Cusinier et al. (2011) u neupravené zeminy, avšak je patrná u distribuce pórů detekovaná Locat et al. (1996). Na rozdíl od Cusinier et al. (2011) použili Locat et al. (1996) pro svoji studii zeminu blízkého mineralogického složení jako má zkoumaná zemina. Hydraulická vodivost neupraveného vzorku po zhruba 100 dnech propouštění dosahuje hodnoty $k \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$. Průběh hydraulické vodivosti neupraveného vzorku 0b_1 s rostoucí dobou propouštění je velmi podobný vývoji hydraulické vodivosti s časem publikovaný Le Runigem et al. (2009, Obr. 4.14), i když byl vzorek při OMC hutněn odlišným způsobem (kapitola 4.1). Průběh hydraulické vodivosti neupraveného vzorku 0a_1 s rostoucí dobou propouštění však nebyl znatelně ovlivněn změnou pórovitosti makropórů a hrubých pórů, kterou jsem způsobila manipulací vzorku během zkoušky propustnosti.

Ze směsi zeminy s 1% CaO jsem připravila 5 vzorků, které jsem nechala zrát 1-28 dní. Pouze vzorek 1_28 byl hutněn při vlhkosti pod jeho optimum. Všechny připravené vzorky jsem prodobila zkoušce propustnosti. Hodnoty pórovitostí n kolem 40% stanovené na zkoumaných vzorcích před a po zkoušce propustnosti se výrazně neliší. Vzorky mají i velmi podobný vývoj hydraulické vodivosti s rostoucí dobou propouštění, avšak jsou propustnější než neupravená zemina. Po zkoušce propustnosti byl zaznamenán pokles pórů o poloměru mezi 0,04 a 0,14 μm a nárůst objemu pórů o poloměru mezi 0,14 a 3,75 μm . Naopak distribuce mezopórů a hrubých pórů se nemění. Le Runigo et al. (2009) na zemině s 1% CaO hutněné NE při vlhkosti OMV po 150 dnech propouštění také zaznamenali změny poloměru pórů podobného rozsahu. Tedy nárůst pórů o poloměru 0,6 – 4 μm a pokles pórů o poloměru 0,05 – 0,6 μm .

Ze směsi zeminy s 8% CaO jsem připravila 5 vzorků, které jsem nechala zrát 1-120 dní. Pouze vzorek 8_28 byl hutněn při vlhkosti lehce pod jeho optimum. Všechny připravené vzorky jsem prodobila zkoušce propustnosti. Hodnoty pórovitostí n stanovené před a po zkoušce propustnosti se výrazně neliší, přesto hydraulická vodivost klesá s rostoucím stářím vzorku a vzorky 8a_14, 8a_28 a 8a_120 dosahují hydraulické vodivosti blízké hodnotě neupravené zeminy po dlouhé době propouštění. Pórovitost hrubých pórů se během propouštění nemění, ale pórovitost makropórů klesá a pórovitost mezopórů roste.

Le Rungo et al. (2009) také zaznamenali u zeminy s 3% CaO hutněné při vlhkosti OMV energii NE nárůst pórů o poloměru pod $0,05\ \mu\text{m}$ a pokles pórů o poloměru $0,05 - 0,7\ \mu\text{m}$ (Obr. 4.15), což přisuzují tvorbě novotvořených fází. Ty pravděpodobně mohou vznikat i u studované zeminy s 8 % CaO, protože ani po 90 dnech propouštění se ze zeminy nevytloužily všechny vápenaté ionty, které jsou potřeba pro průběh pucolánových reakcí, a lze tedy pozorovat neustálený pokles Ca^{2+} . Na rozdíl od mých výsledků však nepozorovali Le Rungo et al. (2009) pokles hydraulické vodivosti zeminy vlivem změny pórového prostoru. Autoři předpokládají, že voda proudí pouze póry o poloměru nad $1\ \mu\text{m}$, proto nepozorovali vliv změn distribuce pórů na hydraulickou vodivost upravené zeminy. To ale odporuje úvaze v kapitole 11.2, že všechny póry měřitelné MIP by měly být přístupné pro vodu. Předpokládám, že nízký obsah vápna (3%) a krátká doba zrání (25 dní) neumožnili autorům sledovat pokles hydraulické vodivosti s rostoucí dobou propouštění. Mé výsledky spíše korespondují s poznatky Wilda et al. (1987), podle nichž hydraulickou vodivost vápněné zeminy ovlivňují póry o poloměru již od $0,04\ \mu\text{m}$, což má dopad na snížení hydraulické vodivosti vápněné zeminy.

Hydraulická vodivost upravených i neupravených vzorků klesá během prvních 40 - ti dní propouštění. McCallister a Petry (1992) během prvních 12,5 dne propouštění vápněných vzorků také zaznamenali rychlý počáteční pokles hydraulické vodivosti, který spojují s ustalováním proudění. Ve stejném časovém intervalu jsem spočetla objem vody vtlačený do vzorku a objem vody jímáný ze vzorku byly již od prvního dne propouštění srovnatelné. Tyto objemy však s rostoucí dobou propouštění klesaly až došlo k jejich ustálení zhruba po 40-ti dnech propouštění. Le Runigo et al. (2009) přisuzují pokles hydraulické vodivosti zeminy s 1% nebo 3% CaO hutněné při OMC energií LE a zeminy s 0% CaO hutněné při OMC energií NE při prvních 20 dnech propouštění účinkům efektivního napětí. S tímto tvrzením nesouhlasím, protože by se musela změnit pórovitost vzorku během propouštění, což jsem u neupravených ani u upravených vzorků nepozorovala.

12. Závěr

Studie proběhla na směsi jílovitého siltu (spraše odebrané ze zemníku Benátky nad Jizerou) s 1, 2, 4 a 8% CaO. Velký důraz byl kladen na přípravu zkušebních vzorků, která musela zajistit homogenitu pórového prostoru. Na základě úvodních analýz rtuťové porozimetrie byla zemina s vápnem smíšena po dobu 5-ti minut tyčovým mixérem a po 2 hodinách zrání se každá směs hutnila energií Proctor standard při vlhkosti blízké své optimální vlhkosti. Změny pórového prostoru studované zeminy s rostoucím množstvím vápna a s rostoucí dobou zrání byly sledovány pomocí rtuťové porozimetrie a hydraulická vodivost vápněných zemin po různé době zrání byla stanovena zkouškou propustnosti.

Optimální množství vápna (OMV), které zajišťuje maximální modifikaci zeminy s ohledem na plasticitu a únosnost, bylo stanoveno 4 způsoby. Jako nejvhodnější metodu pro stanovení OMV vyšel pH test (Eades a Grim, 1966), jehož výslednou hodnotu OMV doporučuji ověřit ze závislosti indexu plasticity na množství vápna stanovené po 1 hodině zrání zeminy s vápnem (Eades a Grim, 1966).

Bylo ověřeno, že rtuťová porozimetrie (MIP) je vhodná metoda pro sledování změn pórového prostoru po dlouhou dobu zrání (1 – 540 dní) na laboratorně zhutněných vzorcích spraše s 1, 2, 4 a 8% CaO. Odhalila, že 2% CaO je dostačující pro vznik pucolánových reakcí, i když toto množství vápna je pod hodnotou optimálního množství vápna (2,85% CaO). Dále díky výsledkům MIP lze stanovit pórovitost mezopórů, makropórů a hrubých pórů, kterou lze využít ke statistickému vyhodnocení vlivu okamžitých a dlouhodobých reakcí ve zvolené kategorii pórů. Díky flokulaci jílových částic se u směsi zeminy s 1% CaO a 2% CaO významně zvyšuje množství makropórů o poloměru 0,025 – 0,35 μm a u směsi s 4% CaO a 8% CaO se významně zvyšuje množství makropórů o poloměru 0,025 – 0,6 μm . Tyto změny pórového prostoru mají za následek zvýšení pórovitosti n_{MIP} s rostoucím množstvím vápna a pokles suché objemové hmotnosti vápněné zeminy.

Vznik novotvořených minerálů dlouhodobě ovlivňuje distribuci pórů o poloměru pod 0,5 μm pro směs zeminy s 1% a 2% CaO a pod 1 μm pro směs zeminy s 4% a 8% CaO. U zeminy

s 1% CaO pórovitost makropórů klesá a pórovitost mezopórů roste během prvních 28 dní zrání a je spojována se vznikem portlanditu. Poté už u této směsi nebyly detekovány žádné změny v pórovém prostoru. U zeminy s 2% CaO během prvních 120 dní zrání, u zeminy s 4% CaO během prvních 360 dnů a u zeminy s 8% CaO dokonce i po 540 dnech zrání pórovitost makropórů klesá a pórovitost mezopórů roste vlivem formování novotvořených minerálních fází (hydratovaného silikátu vápenatého, hydratovaného hlinitanu vápenatého a hydratovaného hlinitouhličitanu vápenatého). Pórovitost hrubých pórů není ovlivněna ani flokulace jílových částic, ani pucolánovými reakcemi. Ukončení změny distribuce pórů u vápněných zemin bylo pozorovatelné při pH nad hodnotu 11,7.

U neupravené zeminy se nemění během zkoušky propustnosti distribuce pórů o poloměru pod 0,1 μm . Hydraulická vodivost neupraveného vzorku po zhruba 100 dnech propouštění dosahuje hodnoty $k \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$.

Hydraulická vodivost u studované zeminy upravené 1% CaO po 1, 7, 14 a 28 dnech zrání klesla během prvních 40-ti dní propouštění k hodnotě $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, ale i po dlouhodobém propouštění zůstala propustnější než neupravená zemina. Po ukončení dlouhodobé zkoušky propustnosti nebyla pozorována změna distribuce mezopórů. Nedošlo ani k větším změnám distribuce hrubých pórů. Vlivem saturace došlo pouze k redistribuci makropórů avšak bez většího vlivu na její hodnotu pórovitosti n_{MIP} .

Hydraulická vodivost u studované zeminy upravené 8% CaO po 1, 7, 14, 28 a 120 dnech zrání klesla během prvních 40-ti dní propouštění k hodnotě $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, avšak pouze vzorky zrající 14, 28 nebo 120 dní tuto hodnotu překročily a dosáhly velmi blízkých hodnot hydraulické vodivosti neupravené zeminy. Po ukončení dlouhodobé zkoušky propustnosti nebyla pozorována změna distribuce hrubých pórů, přesto byl zaznamenán pokles hydraulické vodivosti s rostoucí pórovitostí mezopórů a s klesající pórovitostí makropórů. Nárůst pórovitosti mezopórů na úkor pórovitosti makropórů je pravděpodobně způsoben tvorbou novotvořených fází i pod hladinou vody.

Vápnem upravený jílovitý silt hutněný energií Proctor standard při optimální vlhkosti by bylo možno použít do staveb, kde se klade důraz na nízkou hydraulickou vodivost upravené zeminy, avšak by bylo nutno použít až trojnásobek hodnoty optimálního množství vápna, což je ekonomicky velmi nákladné. Účinek vznikajících novotvořených minerálních fází, které by způsobily změnu struktury upravené zeminy, která by měla vliv na pokles hydraulické vodivosti, by byl však znatelný po více než 4 měsících zrání, což není pro potřeby praxe moc reálné.

Literatura

Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., Alcover, J.-F. (2010a). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C. *Applied Clay Science* 50, 191 – 198.

Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., Alcover, J.-F. (2010b). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50°C. *Applied Clay Science* 50, 199 – 203.

Arabi, M. a Wild, S. (1986). Microstructural development in cured soil – lime composites. *Journal of materials science* 21 (2), 497 – 503.

ASTM D 6276 (2000) Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.

Barret E.P., Joyner L.G. and Halenda P.P. (1951). The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms, *Journal of the American Chemical Society*, 73, 373-380.

Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42, 223-237.

Benson, C.H. A Daniel, D.E. (1990). Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering* 116(8), 1231 – 1248.

Benson, C.H., Zhai, H., Wang, X. (1994). Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering* 120(2), 366 -387.

Bérubé, M. A., Choquette, M., Locat, J. (1990). Effects of lime on common soil and rock forming minerals. *Applied clay science*, 5, 145-163.

Bílek, V. (2002). Dlouhodobé zkušenosti s úpravou zemin vápnem v ČR. *Silnice a mosty*, 2, 23-27.

- Boardman, D. I., Glendinning, S., Rogers, C. D. F. (2001). Development of stabilization and solidification in lime – clay mixes, *Geotechnique*, 50 (6), 533-543.
- Boynton, S.S a Daniel, D.E. (1985). Hydraulic conductivity tests on compacted clay, *Journal of Geotechnical Engineering* 111(4), 465 – 478.
- Bozbey, I. a Garaisayev, S. (2009). Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay, *Environmental Earth Science*, 60, 1137- 1151.
- Brandl, H. (1981). Alteration of soil parameters by stabilization with lime. *Proceeding of the 10th conference on soil mechanics and foundation engineering*, Stockholm 1981, 3, 587-594.
- BS 1924 – 2 (1990). Stabilized materials for civil engineering purposes – Part 2: Methods of test for cement – stabilized and lime – stabilized materials.
- Clare, K. E. & Cruchley, A. E. (1957). Laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime. *Geotechnique*, 17 (7), 97-110.
- Consoli, N.C., Lopes, L. S., Heineck, K.S. (2009). Key parameters for the strength control of lime stabilized soils, *Journal of materials in civil engineering*, 21 (5) , 210 – 216.
- Croft, J. B. (1964). The processes involved in the lime stabilization of clay soils. *Proceeding Australian Road Board*, Part 2, 1196 – 1203.
- Cuisinier, O., Auriol, J.-C., Le Borne, T. a Deneele, D. (2011). Microstructure and hydraulic conductivity of compacted lime-treated soil, *Engineering Geology*, 123, 187 – 193.
- ČSN CEN ISO/TS 17892 – 1 (2005). *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti zemin.*
- ČSN CEN ISO/TS 17892 – 4 (2005). *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin.*
- ČSN CEN ISO/TS 17892- 11 (2005). *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu.*
- ČSN CEN ISO/TS 17892 – 12 (2005). *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí.*

ČSN EN 459-1 (2011). Stavební vápno - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody.

ČSN EN 459-2 (2011). Stavební vápno - Část 2: Zkušební metody.

ČSN EN 13286 – 2 (2005). Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška.

ČSN EN 14227-11 (2008). Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace - Část 11: Zeminy upravené vápnem.

ČSN EN ISO 14688 – 2 (2005). Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařizování zemin – Část 2: Zásady pro zařizování.

Diamond S., White, J.L. a Dolch, W.L. (1964). Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack, *Clays and clay minerals*, 359 – 379.

Diamond, S. (1970). Pore size distribution in clays. *Clays and clay minerals*, 18, 7-23.

Drake, L.C. (1945) Pore-size distribution in porous materials. Application of high pressure mercury porosimeter to cracking catalysts, *Industrial and engineering chemistry*, 41, 780 - 785.

Eades, J.E. a Grim, D.E. (1960). Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highway Research board* 262, 51 – 63.

Eades, J.E. a Grim, D.E. (1966). A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Board Record* 139, 61-72.

Feber, V., Auriol, J.C., Cui, Y.J. a Magnan, J.P. (2008). Wetting-induced volume changes in compacted silty clays and high-plasticity clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(2), 252 – 265.

Felmy, A.R., Cho, H., Rustad, J. R., Mason, M. J. (2001). An aqueous thermodynamic model for polymerized silica species to high ionic strength. *Journal of solution chemistry*, 30 (6), 509 – 525.

Gillott, J.E. (1973). Methods of sample preparation for microstructural analysis of soil. *Soil Microscopy*, 4th International Working-Meeting on Soil Micromorphology, Kingston, Jamaica,

143 – 164.

Glenn, G.R. a Handy, R.L. (1963). Lime-clay mineral reaction products. Highway research record 29, 70 – 82.

Hilt, G. H. a Davidson, D. T. (1960). Lime fixation of clayey soils. Highway Research Board, Bulletin 262, 20 – 32.

Hlaváč, J. (1981). Základy technologie silikátů. SNTL, Praha, 516.

Chen, J.J., Thomas, J.J., Taylor, H.F.W., Jennings, H. M. (2004). Solubility and structure of calcium silicate hydrate, Cement and concrete Research 34, 1499 – 1519.

Choquette, M., Bérubé, M.A. a Locat, J. (1987). Mineralogical and microtextural changes associated with lime stabilization of marine clays from eastern Canada, Applied clay science, 2, 215 – 232.

IUPAC Physical chemistry manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units, Butterworths, London, 1972

Kaneko, K. (1994). Determination of pore size and pore distribution 1. Absorbents and catalysts. Journal of membrane science, 96, 59 – 89.

Kenney, T.C., Van Veen, W.A., Swallow, M.A., Sungaila, M.A. (1992). Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures. Canadian Geotechnical Journal 29, 364 – 374.

Klika, Z. a Weiss, Z. (1993). CQPA, Program for chemical quantitative phase analysis. Central analytical laboratory – Technical University of mining and metallurgy, Ostrava.

Kodikara, J., Barbour, S.L. A Fredlund, D.G. (1999). Changes in clay structure and behaviour due to wetting and drying. Proceedings of the 8th Australian – New Zealand conference on Geomechanics, February 15 – 17, 179 – 186.

Kouassi, P., Breysse, D., Girard, H., Poulain, D. (2000). A new technique of kneading compaction in the laboratory. Geotechnical testing journal 23, 72 – 82.

Lambe, T. (1954). The permeability of compacted fine-grained soils. ASTM Special Publication 163, 56 – 67.

- Lasledj, A. a Al-Mukhtar, M. (2008). Effect of hydrated lime on the engineering behaviour and the microstructure of highly expansive clay. 12th international conference of international association for computer methods and advances in geomechanics, 3590 – 3598.
- Lawrence, G.P. (1978). Stability of soil pores during mercury intrusion porosimetry. *Journal of soil Science*, 29, 299 – 304.
- Le Runigo, B., Cusinier, O., Cui, Y.-J., Ferber, V. a Deneele, D. (2009). Impact of initial state on the fabric and permeability of lime-treated silt under long-term leaching, *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 1243 – 1257.
- Le Runigo, B., Ferber, V., Cui, Y.J., Cuisinier, O., Deneele, D. (2011). Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions, *Engineering Geology*, 118, 20 – 28.
- Little, D. N. (1995). *Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*. Kendall/Hunt, Iowa
- Locat, J., Bérubé, M.A. a Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian geotechnical journal* 27, 294 – 304.
- Locat, J., Trembley, H., Leroueil, S. (1996). Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 654 – 669
- McCallister, L. D. a Petry, T. M. (1990). Property changes in lime treated expansive clays under continuous leaching. Technical Report GL-90-17, 424 str.
- McCallister, L. D. a Petry, T. M. (1992). Leach tests on lime treated clays. *Geotechnical testing journal*, 15 (2), 106 – 114.
- Metelková, Z. a Boháč, J. (2008). Vliv zlepšení zpracovatelnosti zeminy vápnem na její propustnost. *Geotechnika* 2/2008, 13-17.
- Metelková Z., Boháč J., Sedlářová I. (2010). Effect of lime treatment on pore size and permeability of MSW liners, 6th International Congress on Enviromental Geotechnics (Manoj Datta et al, eds) , New Delhi, India, McGraw Hill, Vol. 1, 390-395.
- Metelková, Z., Boháč, J., Přikryl, R., Sedlářová, I. (2012). Maturation of loess treated with variable lime admixture: Pore space textural evolution and related phase changes, *Applied*

clay science, 61, 37 – 43.

Metelková, Z., Bláhová, J., Hanzlíková, I., Pastyrik, P. A Petřina, V. (2014). Sled a řízení geomechanických laboratorních zkoušek a průběžné zpracování jejich výsledků, Zpráva za rok 2014 projektu FR-TI4/714 Výzkum a inovace úprav horninového prostředí vápennými aditivy.

Mitchell, J. K. (1976). Fundamentals of soil behaviour, John Wiley and Sons, New York

Mitchell, J., Hooper, D., Campanella, R. (1965). Permeability of compacted clay. Journal of soil mechanics and foundation division, ASCE, 91(4), 41 – 65.

Mitchell, J.K. a Madsen F.T. (1987). Chemical effect on clay hydraulic conductivity, Geotechnical practice for waste disposal, ASCE Geotechnical special publication, 13, 87 – 116.

Mitchell, J.K. a Dermatas, D. (1992). Clay soil heave caused by lime-sulfatereactions, Innovations and uses for lime – book, 42 – 63.

Moorehead, D.R. (1986). Cementation by the carbonation of hydrate lime. Cement and concrete research, 16, 700 – 708.

Nalbantoglu, Z. & Tuncer, E. R. (2001). Compressibility and conductivity of a chemically treated expansive clay. Canadian geotechnical journal, 38, 154 – 160.

Osinubi, K. J. (1998). Permeability of lime – treated lateritic soil. Journal of transportation engineering, ASCE, 124 (9), 465 – 469.

Osula, D. O. A. (1996). A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. Engineering Geology, 42, 71 – 81.

Penumandu, D. A Dean, J. (2000). Compressibility effect in evaluating the pore-size distribution of kaolin clay using mercury intrusion porosimetry, Canadian Geotechnical Journal, 37(2), 393 – 405.

Quang, N.D. a Chai, J.CH. (2015). Permeability of lime- and cement-treated clayey soils, Canadian geotechnical journal, 52, 1221 – 1227.

- Roberts, M.H. (1957). New calcium aluminate hydrates. *Journal of applied chemistry* 7, 543 – 546.
- Rogers, C. D. F. a Glendinning, S. (1996). Modification of clay soil using lime. 99 – 114, In book *Lime stabilization*, Thomas Telford, London, 183 str.
- Rogers, C. D. F., Glendinning, S., Roff, T. E. J (1997). Lime modification of clay soils for construction expediency. *Geotechnical engineering*, 125 (4), 242 – 249.
- Rouquerol, J., Avnir, D., Fairbridge, C.W., Everett, D.H., Haynes, J.H., Pernicone, N., Ramsay, J.D.F., Sing, K.S.W. & Unger, K.K. (1994). Recommendations for the characterization of porous solids. *Pure and applied chemistry*, 66 (8), 1739 – 1758.
- Ruike, M. T. Kasu, T., J N. Setoyama, J N., T. Suzuki, T. a K. Kaneko, K. (1994). Inaccessible Pore Characterization of Less-Crystalline Microporous Solids. *Journal of Physical Chemistry*, 98 (38), 9594 – 9600.
- Russo, G., Dal Vecchio, S., Mascolo, G. (2007). Microstructure of a lime stabilised compacted silt. *Experimental unsaturated soil mechanics*, T. Schanz (Ed.), 112 *Springer Proceedings in Physics*, 49 – 56.
- Skempton, A. (1953), The colloidal activity of clay. *Proceeding of 3rd International conference on soil mechanics and foundation engineering*, Vol. 1, 57 – 61.
- Sotorník, V. (2011). Vliv vápna na konzistenční meze prachovité zeminy. *Bakalářská práce*, 32 str.
- Škvára, F. (2003). *Chemie a technologie anorganických pojiv I. Část 2. Vápenná pojiva. Sádrová pojiva. Ostatní anorganická pojiva. Technologické výpočty. Ústav skla a keramiky VŠCHT Praha*, 165 str.
- Taylor, H. F. W. (1961). The chemistry of cement hydration , *Progress in ceramic science* 1, 89 – 145 in *Diamond* (1964)
- Taylor, H.F.W. (1997). *Cement Chemistry*, 2nd edition, Thomas Telford, London
- Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics: II. Compressive strength of clay, *Eng. News-Rec.*

Tonoz, M.C., Ulusay, R. a Gokceoglu, C. (2004) Effects of lime stabilization on engineering properties of expansive Ankara Clay. *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe*, Lecture Notes in Earth Science 104, 466 – 474.

TP 94 (2013). Úprava zemin, technické podmínky.

Wang, L., Roy, A., Seals, R. K., Byerly, Z. (2005). Suppression of sulfate attack on a stabilized soil, *Journal american ceramic society*, 88 (6), 1600 – 1606.

Washburn, E.W. (1921). Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 7, 115 – 116.

Wild, S., Arabi, M., Leng-Ward, G. (1986). Soil-lime reaction and microstructural development at elevated temperatures. *Clay Minerals* 21(3), 279 – 292.

Wild, S., Arabi, M., Rowlands, G. O. (1987) Relation between pore size distribution, permeability, and cementitious gel formation in cured clay–lime systems, *Material science and technology*, 12(3), 1005-1011.

Zdravkov, B.D., Čermák, J.J, Šefara, M, Janků, J (2007). Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective. *Central European Journal of Chemistry*, 5(2), 385 – 395.

Přílohy